

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2018

Bc. Lukáš Žlebek



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

EKVALIZACE PŘENOSOVÉHO KANÁLU

EQUALIZATION OF THE TRANSMISSION CHANNEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Žlebek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radim Číž, Ph.D.

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Lukáš Žlebek

ID: 164446

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Ekvalizace přenosového kanálu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a sestavte laboratorní přípravek, kterým bude možné realizovat zkreslení kvadrurně modulovaných signálů po průchodu přenosovým kanálem s vícecestným šířením a aditivním bílým Gaussovským šumem. Dále prostudujte možné způsoby realizace ekvalizačních filtrů a v prostředí MATLAB sestavte demonstrační modely přijímačů s různými typy ekvalizérů, které budou vyrovnávat a následně zpracovávat zkreslený, kvadrurně modulovaný signál. Tento signál bude přiváděn do PC prostřednictvím multifunkční I/O karty PCI-1712 (ADVANTECH) s A/D převodníky. Kromě ekvalizace a detekce symbolů budou modely také zobrazovat časové průběhy signálu a jeho konstelační diagramy před a po ekvalizaci. Vypracujete také vzorovou laboratorní úlohu, která prakticky ukáže účinnost jednotlivých metod ekvalizace přenosových kanálů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] DOŇAR, B., ZAPLATÍLEK, K. MATLAB - začínáme se signály. Praha : BEN, 2006. 272 s. ISBN 80-7300-2-0-0.

[2] DOBEŠ, J., ŽALUD, V. Moderní radiotechnika. Praha : BEN, 2006. 768 s. 80-7300-132-2.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Radim Číž, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem simulace přenosu digitální informace skrz přenosový systém a ekvalizací přenosové funkce celé trasy. Následně je rozebrán návrh a konstrukce přenosového kanálu s vícecestným šířením. V další části je za pomoci hardwarového modulátoru generován modulovaný signál, který je po průchodu přenosovým kanálem a následném nahrání pomocí A/D převodníkové karty do počítače dále ekvalizován a demodulován v programu Simulink. V závěru je vypracována předloha pro laboratorní úlohu a její vzorové řešení.

KLÍČOVÁ SLOVA

LMS, RLS, DFE, 16-QAM, adaptivní systémy, filtr, přenosový kanál, ekvalizér, modulátor, demodulátor, modulovaný signál, nosná, Simulink.

ABSTRACT

This thesis describes a design of a simulation of transmission of digital information via communication system and equalization of communication function. The layout of communication channel with multiway transmission is described in following part. Next part is about hardware modulator which generate modulated signal which is transmitted via communication channel and after is sampled by A/D conversion card to computer, where is equalized and demodulated in Simulink. In the last part of this thesis, there is proposal of the laboratory task and its sample solution.

KEYWORDS

LMS, RLS, DFE, 16-QAM, adaptive systems, filter, transmission channel, equalizer, modulator, demodulator, modulated signal, carrier signal, Simulink.

ŽLEBEK, Lukáš. *Ekvalizace přenosového kanálu*. Brno, 2018, 75 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Radim Číž, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Ekvalizace přenosového kanálu“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing.Radimovi Čížovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
podpis autora

OBSAH

Úvod	13
1 Teoretická část diplomové práce	14
1.1 Zpracování signálů	14
1.1.1 Filtr s konečnou impulzní odezvou (FIR)	14
1.1.2 Filtr s nekonečnou impulzní odezvou (IIR)	15
1.2 Adaptivní systém	15
1.2.1 Struktura adaptivního systému	15
1.2.2 Adaptační algoritmy	16
1.2.3 LMS algoritmus	16
1.2.4 RLS algoritmus	18
1.3 Ekvalizéry	19
1.3.1 Princip ekvalizace	19
1.3.2 Typy adaptivních ekvalizérů	20
2 Praktická část diplomové práce	23
2.1 Modely přenosového systému s ekvalizací	23
2.1.1 Popis systému	23
2.1.2 Model vysílače	25
2.1.3 Model přenosového kanálu	26
2.1.4 Model přijímače	28
2.1.5 Výsledky použitých metod ekvalizace	30
2.2 Laboratorní přípravek	37
2.2.1 Návrh a simulace přípravku	37
2.2.2 Návrh DPS a konstrukce přípravku	39
2.2.3 Měření výsledků hotového přípravku	41
2.3 Nahrávání signálu a zpracování v PC	42
2.4 Demodulace a výsledky	46
2.5 Laboratorní úloha	54
3 Závěr	55
Literatura	58
Seznam symbolů, veličin a zkratk	59
Seznam příloh	60
A Zadání laboratorní úlohy	61

B	Vzorové vypracování	65
C	Protokol o měření	67
D	Schéma	71
E	Osazovací plán a deska plošného spoje	72
F	Rozpiska součástek	73
G	Potisk panelu	74
H	Obsah přiloženého CD	75

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Blokové schéma základního adaptivního systému.	15
1.2	Blokové schéma adaptivního systému s LMS algoritmem.	17
1.3	Vyhledávání nulového gradientu střední kvadratické odchylky.[3] . . .	17
1.4	Blokové schéma principu adaptivního ekvalizéru.[1]	20
1.5	Základní rozdělení adaptivních ekvalizérů podle parametrů.[1]	21
1.6	Blokové schéma lineárního ekvalizéru s transversálním filtrem[1]. . . .	21
1.7	Blokové schéma nelineárního ekvalizéru se zpětnovazebním filtrem[1].	22
2.1	Blokové schéma přenosového systému.	23
2.2	Blokové schéma simulace.[6]	24
2.3	Blokové schéma zapojení vysílače.	25
2.4	Časové průběhy v modelu vysílače.	26
2.5	Blokové schéma zapojení přenosového kanálu.	26
2.6	Časové průběhy v modelu přenosového kanálu.	27
2.7	Blokové schéma zapojení přijímače.	28
2.8	Blokové schéma zapojení vstupního bloku přijímače.	29
2.9	Blokové schéma zapojení vstupního bloku přijímače.	29
2.10	Časové průběhy v demodulátoru přijímače.	30
2.11	Časové průběhy na výstupu přijímače při rozptylu šumu 0.	31
2.12	Časové průběhy na výstupu přijímače při rozptylu šumu 1.	31
2.13	Časové průběhy na výstupu přijímače při rozptylu šumu 5.	32
2.14	Konstelační diagram vyslaného signálu.	32
2.15	Konstelační diagram přijatého signálu, bez ekvalizace, při rozptylu šumu 0.	33
2.16	Konstelační diagram přijatého signálu, bez ekvalizace, při rozptylu šumu 1.	33
2.17	Konstelační diagram přijatého signálu po ekvalizaci LMS při rozptylu šumu 0.	34
2.18	Konstelační diagram přijatého signálu po ekvalizaci LMS při rozptylu šumu 1.	34
2.19	Konstelační diagram přijatého signálu po ekvalizaci RLS při rozptylu šumu 0.	35
2.20	Konstelační diagram přijatého signálu po ekvalizaci RLS při rozptylu šumu 1.	35
2.21	Konstelační diagram přijatého signálu po ekvalizaci DFE při rozptylu šumu 0.	36
2.22	Konstelační diagram přijatého signálu po ekvalizaci DFE při rozptylu šumu 1.	36

2.23	Schéma zapojení přenosového kanálu.[7][8]	37
2.24	Simulace časových průběhů vstupního a výstupního signálu po průchodu přímé a první odražené cesty.	38
2.25	Simulace časových průběhů vstupního a výstupního signálu po průchodu přímé a druhé odražené cesty.	38
2.26	Simulace časových průběhů vstupního a výstupního signálu všech tří cest s přidáním rušivým signálem o efektivní hodnotě 1V.	39
2.27	Schéma přenosového kanálu.	40
2.28	Pohled na panel přenosového kanálu.	40
2.29	První kanál (modrý) zobrazuje signál na vstupu přípravku, druhý kanál (fialový) signál po průchodu přímou a první odraženou cestou.	41
2.30	První kanál (modrý) zobrazuje signál na vstupu přípravku, druhý kanál (fialový) signál po průchodu přímou a druhou odraženou cestou.	41
2.31	První kanál (modrý) zobrazuje signál na vstupu přípravku, druhý kanál (fialový) signál po průchodu všemi cestami s přidáním rušivého bílého šumu o efektivní hodnotě 1,5 V.	42
2.32	Fotografie použitého IQ modulátoru[5].	43
2.33	Blokové schéma nahrávání signálů do počítače.	43
2.34	Časové průběhy nahrávání signálů v reálném čase při použití dvou kanálů A/D převodníkové karty.	44
2.35	Blokové schéma zapojení nahrávání signálů do souboru.	45
2.36	Ukázka začátku matice s uloženými signály.	46
2.37	Blokové schéma přijímací části v programu Simulink.	46
2.38	Časové průběhy signálu nosného, modulovaného a zkresleného modulovaného po průchodu přenosovým kanálem.	47
2.39	Vnitřní blokové schéma demodulátoru.	48
2.40	Zaokrouhlovací funkce pro blok Rounding Function.	48
2.41	Časové průběhy signálu uvnitř demodulátoru, první průběh zobrazuje signál po násobení nosného a modulovaného signálu, druhý průběh zobrazuje signál za filtrem, třetí signál zobrazuje navzorkovaný signál a čtvrtý průběh zobrazuje signál po zaokrouhlení.	49
2.42	Porovnání výsledků datových průběhů jednotlivých demodulátorů.	50
2.43	Časové průběhy počátku nastavování ekvalizérů, modrý - požadovaný signál, červený - nastavování LMS ekvalizéru, zelený - nastavování RLS ekvalizeru.	51
2.44	Konstelační diagram vysílaného signálu.	51
2.45	Konstelační diagram přijatého signálu bez ekvalizace.	52
2.46	Konstelační diagram přijatého signálu po ekvalizaci LMS.	52
2.47	Konstelační diagram přijatého signálu po ekvalizaci RLS.	53

A.1	Blokové schéma základního adaptivního systému.	62
A.2	Blokové schéma adaptivního systému s LMS algoritmem.	63
A.3	Vyhledávání nulového gradientu střední kvadratické odchylky.[3] . . .	63
D.1	Schéma přípravku přenosového kanálu.	71
E.1	Osazovací plán přípravku přenosového kanálu.	72
E.2	DPS přípravku přenosového kanálu v měřítku 1:1, skutečný rozměr je 42x47 mm.	72
G.1	Potisk panelu generátoru v měřítku 1:1, skutečný rozměr je 152x68 mm.	74

SEZNAM TABULEK

2.1	Tabulka chybovostí použitých ekvalizérů.	54
-----	--	----

ÚVOD

Cílem této práce je vytvoření digitálního přenosového systému, tento přenosový systém se dá rozdělit na tři hlavní bloky, těmi jsou vysílač, přenosový kanál a přijímač. Mezi hlavní části, kterými se tato práce zabývá, patří přenosový kanál a přijímač. V přenosovém kanálu se kvůli vícecestnému šíření zkreslí přenášený signál, který musí být v přijímači ekvalizován, aby mohl být dále správně demodulován. Použité adaptivní ekvalizéry jsou v dnešní době využívány v různých aplikacích při zpracování signálů.

V úvodní části se nachází teoretický úvod do zpracování signálů, adaptivních systémů a adaptivních ekvalizérů, kde je seznámení s jejich základními typy a principy. Dále jsou popsány konkrétní typy adaptivních ekvalizérů, které budou použity v laboratorní úloze jako ukázkové.

Praktická část se zabývá návrhem celého přenosového systému v programu Simulink a vysvětlením jednotlivých funkčních bloků s jejich nastaveními a ukázkami jak mezivýstupních signálů, tak vzájemné porovnání výsledků použitých typů ekvalizačních technik, které zpracovávají signál po průchodu přenosovým kanálem s vícecestným šířením a přidaným Gaussovským šumem. V další části je návrh a realizace přípravku přenosového kanálu s vícecestným šířením. Následně je tento přípravek použit v konkrétním zapojení společně s IQ modulátorem, který slouží jako vysílač 16-QAM modulovaného signálu. Signál z přenosového kanálu je dále načítán A/D převodníkovou kartou PCI-1712 do počítače, kde jsou v programu Simulink modely ekvalizérů a demodulátorů, kde je zkreslený modulovaný signál nejprve opraven a poté demodulován. V poslední části je předloha a vypracování laboratorní úlohy. Pomocí této úlohy budou demonstrovány ukázky základních typů adaptivních ekvalizérů.

1 TEORETICKÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

1.1 Zpracování signálů

Jedna z nejčastějších operací při zpracování signálů je potlačování šumu a zkreslení, které vzniká průchodem signálu přes přenosový kanál (ekvalizace) pomocí filtrace. Různými filtračními technikami lze užitečný signál ze zarušeného signálu obnovit. To se provádí tak, aby došlo ke zvýraznění požadovaných složek signálu nebo potlačení nežádoucích složek. Existuje mnoho způsobů filtračních technik, které se dělí podle realizace, od primitivních analogových filtrů, až po pokročilé číslicové filtry. Analogové filtry se používají v méně náročných aplikacích například dolní nebo horní propust. Pro složitější aplikace se používají diskrétní číslicové filtry. Tyto diskrétní filtry dělíme na dvě základní skupiny:

- Filtr s konečnou impulzní odezvou (FIR)
- Filtr s nekonečnou impulzní odezvou (IIR)

1.1.1 Filtr s konečnou impulzní odezvou (FIR)

Základní vlastnost tohoto typu filtru je, že jeho impulzní charakteristika má konečný počet hodnot:

$$h[n] = 0 \text{ pro } n < 0 \text{ a } n \geq N \text{ (pro kauzuální systém),}$$

$$y[n] = x[n] * h[n] = \sum_{m=0}^{N-1} h[m]x[n-m], \quad (1.1)$$

$$H(z) = \sum_{m=0}^{N-1} h[m]z^{-m}$$

Filtr je vždy stabilní a je nerekurzivní. Pokud má filtr symetrickou nebo antisymetrickou impulzní charakteristiku má lineární kmitočtovou a fázovou charakteristiku. Při implementaci vyžaduje tento typ filtru velkou paměť pro uložení koeficientů což způsobuje velké zpoždění při výpočtu výstupního signálu. Má široké spektrum využití například pro adaptivní zpracování signálu, narozdíl od IIR filtru, který je pro takové použití nevhodný.[2]

1.1.2 Filtr s nekonečnou impulzní odezvou (IIR)

Vlastností tohoto typu filtru je, že jeho impulzní charakteristika má nekonečný počet hodnot a pro kauzální systém platí:

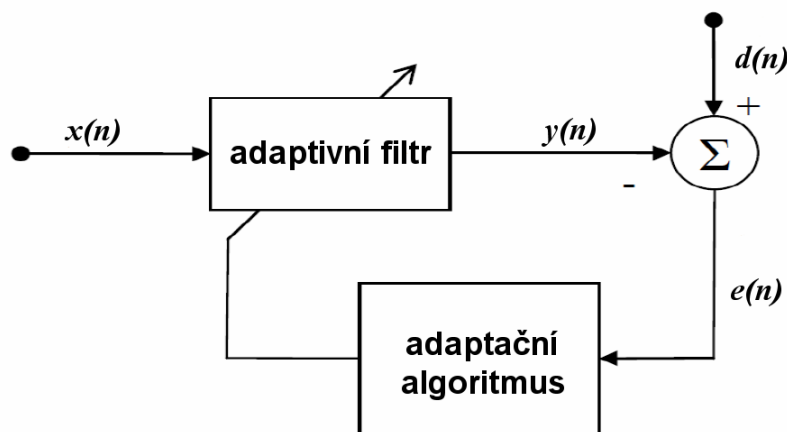
$$y[n] = x[n] * h[n] = \sum_{m=0}^{\infty} h[m]x[n-m] \quad (1.2)$$

U tohoto typu filtru při hardwarové implementaci často nastávají problémy se stabilitou vlivem kvantování koeficientů a chybou mezivýsledků aritmetických operací. V celé kmitočtové charakteristice je fázová charakteristika vždy nelineární. Při implementaci vyžaduje tento typ filtru narozdíl od FIR filtru malou paměť pro uložení koeficientů.[2]

1.2 Adaptivní systém

1.2.1 Struktura adaptivního systému

Jakýkoli adaptivní systém se skládá ze dvou základních funkčních bloků. Prvním z nich je adaptační algoritmus, který určuje koeficienty adaptačního filtru a ten pak upravuje výstupní signál. V základním adaptivním systému jsou čtyři signály: vstupní signál $d(n)$, vstupní referenční signál $x(n)$, dále pak výstupní chybový signál $e(n)$ a posledním je výstupní signál adaptivního filtru $y(n)$.



Obr. 1.1: Blokové schéma základního adaptivního systému.

Adaptivní systémy se v praxi používají hlavně z toho důvodu, že často musí pracovat v předem neznámém prostředí, v němž je obvykle obtížná předběžná identifikace vlivu stálého rušení, nebo v časově proměnném prostředí, kde nelze žádným způsobem předpovídat rušivé vlivy. Proto je vhodné použití adaptivních systémů,

kde se hodnoty optimálních koeficientů filtrů mění v čase, v závislosti na okolním rušení.

Jako adaptivní filtry se nejčastěji používají číslicové diskrétní filtry s konečnou impulzní odezvou (FIR) N-tého řádu, kvůli jejich stabilitě a lineární fázi. Také platí, že čím je řád filtru větší, tím je výsledek přesnější, ale výpočet o to náročnější. O přesné nastavení jednotlivých koeficientů filtrů se starají adaptační algoritmy.

1.2.2 Adaptační algoritmy

Adaptační algoritmus je důležitým prvkem pro nastavování koeficientů filtru. Samotný algoritmus je matematický popis adaptace. Hlavní představitelé adaptivních algoritmů jsou: LMS (Least Mean Square), který je založený na teorii Wienerovy filtrace a RLS (Recursive Least Square) založený na teorii Kalmanovy filtrace. Dále pak existují různé modifikace těchto algoritmů, které se snaží různými způsoby vylepšit parametry filtrace, aby byla splněna efektivita filtru v závislosti na určitých podmínkách, kterými můžou být například: poměr adaptace, chování v negaussovském prostředí, zatížení kolísání nebo odchylky chybového signálu.

- Poměr adaptace
- Výpočtové požadavky
- Adaptace na prostředí

Poměr adaptace, neboli poměr konvergence, udává jak rychle se systém může přiblížit k optimálnímu nastavení vah filtrů.

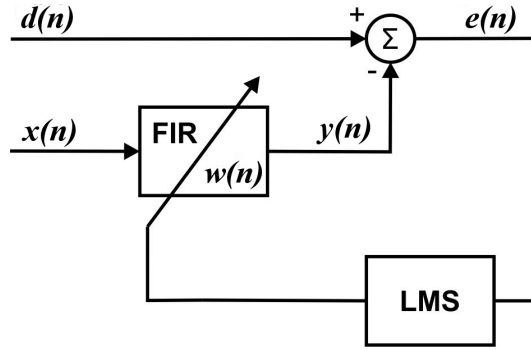
Výpočtové požadavky popisují složitost a počet operací za daný čas potřebný pro vyhodnocení výstupních dat algoritmu.

Adaptace na prostředí je schopnost přizpůsobení filtru na různé prostředí s různě velkým šumem.

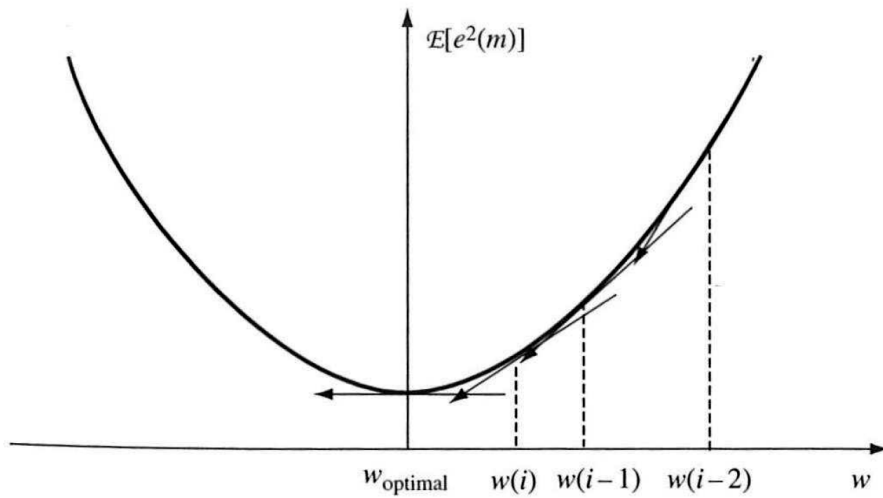
1.2.3 LMS algoritmus

LMS (Least Mean Square) - algoritmus nejmenší střední kvadratické odchylky nebo také metoda největšího spádu. Tento algoritmus byl navržen Widrowem a Hoffem. Stal se základním představitelem gradientních algoritmů, které jsou založeny na teorii Wienerovy filtrace, metodě nejmenších čtverců a stochastickém průměrování. Mezi jeho hlavní výhody určitě patří nízká výpočtová složitost a vcelku jednoduchá implementace.

Kvadratická křivka s jedním globálním minimem udává závislost střední kvadratické odchylky výstupního chybového signálu adaptivního FIR filtru na koeficientech filtru.



Obr. 1.2: Blokové schéma adaptivního systému s LMS algoritmem.



Obr. 1.3: Vyhledávání nulového gradientu střední kvadratické odchylky.[3]

Vyhledávání jednotlivých koeficientů s minimální střední kvadratickou odchylkou se zakládá na posouvání koeficientů ve směru záporného gradientu křivky. Začínající hodnoty koeficientů jsou postupně adaptovány dokud se nedosáhne minima, tedy bodu s nulovým gradientem. Tuto metodu, tedy metodu největšího spádu, můžeme vyjádřit vztahem, kde nahradíme střední kvadratickou odchylku chybového signálu signálem samotným, tím dosáhneme výpočetně jednodušší verzi:

$$w(n+1) = w(n) + \mu \left[-\frac{\partial e^2(n)}{\partial w(n)} \right] \quad (1.3)$$

Chybový signál $e(n)$ vyjádříme:

$$e(n) = d(n) - x^T(n)w(n), \quad (1.4)$$

kde $x(n)$ je vstupní referenční signál. Po dosažení a úpravě dostaneme rovnici:

$$w(n+1) = w(n) + \mu[x(n)e(n)] \quad (1.5)$$

Z této rovnice vyplývá jednoduchá výpočetní náročnost LMS algoritmu, protože se omejdeme bez složitých matematických operací jako derivování, umocňování atd. Rychlost adaptace se udává konstantou μ , tato hodnota musí být zvolena rozumně, jinak může dojít ke špatné adaptaci vah filtrů.[3][4]

1.2.4 RLS algoritmus

RLS (Recursive Least Square) - rekurzivní algoritmus nejmenších čtverců, je druhý nejpoužívanější algoritmus, který je založen na teorii Kalmanovy filtrace. Tento algoritmus pracuje s průměrnými hodnotami veličin počítanými z časového vývoje, místo vzorkovaných průměrů počítaných z několika realizací stejného náhodného procesu. Z toho plyne větší náročnost výpočtu, rozdíl je zhruba o řád vyšší než u LMS. Nadruhou stranu rychlost konvergence je u RLS několikanásobně rychlejší a to z důvodu přesné predikce díky časovému průměrování. Blokové schéma adaptivního filtru zůstává stejné jako u LMS, jen adaptivní proces je jiný. Chybový signál je vyjádřený stejně jako u LMS algoritmu:

$$e(n) = d(n) - x^T(n)w(n), \quad (1.6)$$

koeficienty filtrů jsou adaptovány podle rovnice:

$$w(n+1) = w(n) + \mu[k(n)e(n)], \quad (1.7)$$

kde $k(n)$ je ziskový vektor a počítá se podle rovnice:

$$k(n) = \frac{\lambda^{-1}\Phi_{xx}(n-1)x(n)}{1 + \lambda^{-1}x^T(n)\Phi_{xx}(n-1)x(n)}, \quad (1.8)$$

kde $\Phi_{xx}(n)$ je inverzní autokorelační matice referenčního signálu $x(n)$. Tato matice je následně adaptována podle vztahu:

$$\Phi_{xx}(n) = \lambda^{-1}\Phi_{xx}(n-1) - \lambda^{-1}k(n)x^T(n)\Phi_{xx}(n-1), \quad (1.9)$$

λ je váha ($0 < \lambda \leq 1$), díky které se určuje rychlost konvergence algoritmu. V praxi se nejčastěji nastavuje na hodnotu mezi 0,98 až 1.[3][4]

1.3 Ekvalizéry

1.3.1 Princip ekvalizace

Ekvalizéry se používají v přijímačích, pro kompenzaci kmitočtového (lineárního) zkreslení signálu, které vzniká při průchodu sdělovacím kanálem. U digitálních systémů se toto zkreslení projevuje časovým rozšířením signálových prvků. Důležitým kritériem účinnosti ekvalizace je minimalizace mezisymbolových přeslechů (ISI), ovšem každá ekvalizace (vyrovnání modulové charakteristiky) přináší zesílení kanálového šumu. V praktickém použití se volí kompromis mezi minimalizací mezisymbolových přeslechů a minimalizací šumu. Přenosová funkce ekvalizéru, potřebná pro dokonalou kompenzaci lineárního zkreslení kanálu, je rovna reciproké hodnotě přenosové funkce tohoto kanálu násobené konstantou $K^{-j\omega t_d}$. Z toho důvodu se ekvalizační obvody často nazývají jako inverzní ekvalizační filtry. Samotný adaptivní ekvalizér přizpůsobuje automaticky svou přenosovou funkci aktuálně podle přenosové funkce komunikačního kanálu. Tyto ekvalizéry pak pracují ve dvou základních režimech, podle toho, aby byla zaručena stála adaptace na přenosovou funkci kanálu.[1]

- Tréninkový režim (Training mode)
- Režim sledování (Decision mode)

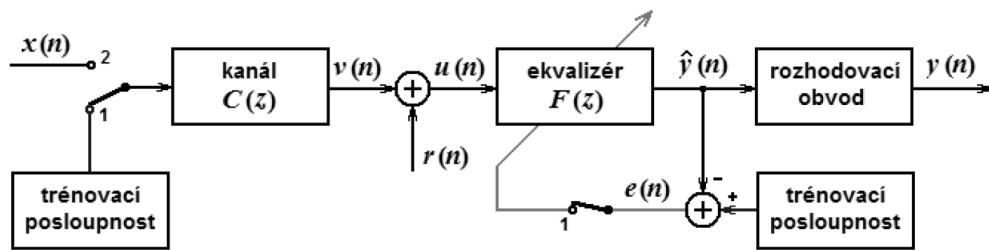
Tréninkový režim

V tomto režimu prochází kanálem signál, který je známý i na straně přijímače a říká se mu tréninková posloupnost. Tento signál může být jakákoliv pseudonáhodná posloupnost, ale musí být jak strana vysílače tak strana přijímače vzájemně synchronizována. Tento signál je na přenosovém kanálu zkreslen, například přidruženým šumem $r(n)$ a dostává se na vstup ekvalizéru $u(n)$. Výstupní signál z filtru $\hat{y}(n)$ je potom odečítán od známe trénovací posloupnosti a výsledný chybový signál $e(n)$ je posílán do ekvalizéru pro nastavení koeficientů filtru. Potřebný čas do správného nastavení neboli natrénování filtru se odvíjí od použitého algoritmu. Po natrénování ekvalizéru se přejde do režimu sledování.

Režim sledování

K tomuto režimu dojde po době, kdy je předpokládáno, že ekvalizér má již správně nastaveny všechny koeficienty filtru a může tak správně pracovat na opravě zaručeného signálu po průchodu přenosovým kanálem. Posílá se pouze datový signál $x(n)$ a po průchodu kanálem a následné opravě v bloku ekvalizéru je vyhodnocován dalšími bloky v přijímači. Tento přijatý a opravený signál by se měl jen minimálně lišit od vyslaného signálu na straně vysílače. Tímto se však dostáváme k problému,

že ne vždy má přenosový kanál stabilní přenosovou charakteristiku. Může například docházet ke snižování a zvyšování šumu. Při přenosu po metalickém vedení může docházet k rušení od okolních vodičů nebo při bezdrátovém vícecestném šíření docházet k posunům fází vlivem odrazu signálů. Na takovéto změny se má filtr přizpůsobovat kontinuálně, a proto je třeba vhodně zvolit poměr tréninkového režimu a režimu sledování, aby bylo možné na proměnné vlivy při přenosu co nejlépe reagovat a nedocházelo k chybám. Ovšem je třeba si uvědomit, že v tréninkovém režimu se nepřenáší užitečná data, pouze se nastavují koeficienty filtrů a tím dochází ke snižování přenosové rychlosti.



Obr. 1.4: Blokové schéma principu adaptivního ekvalizéru.[1]

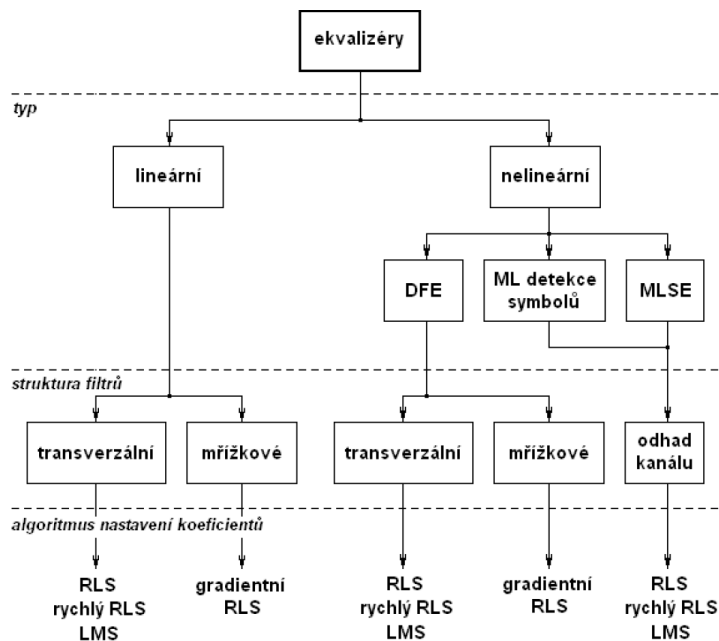
1.3.2 Typy adaptivních ekvalizérů

Hlavní rozdělení ekvalizérů, jak je patrné z obrázku, se dělí podle typu na lineární a nelineární. Další dělení je pak podle struktury použitého filtru na transversální a mřížkové a speciálního případu odhadu kanálu. Další rozdělení pak spočívá v použitém algoritmu, kde se používají základní algoritmy jako LMS nebo RLS nebo jejich různé modifikace jako například gradientní RLS. Nejčastější typy používaných ekvalizérů jsou pak[1]:

- LMS (Least Mean Square) - algoritmus nejmenší střední kvadratické odchylky
- RLS (Recursive Least Square) - rekurzivní algoritmus nejmenších čtverců
- DFE (Decision Feedback Equalizer) - ekvalizér se zpětnou rozhodovací vazbou
- ML (Maximum Likelihood) - nejvíce pravděpodobný odhad
- MLSE (ML Sequence Estimator) - nejvíce pravděpodobný odhad posloupnosti symbolů

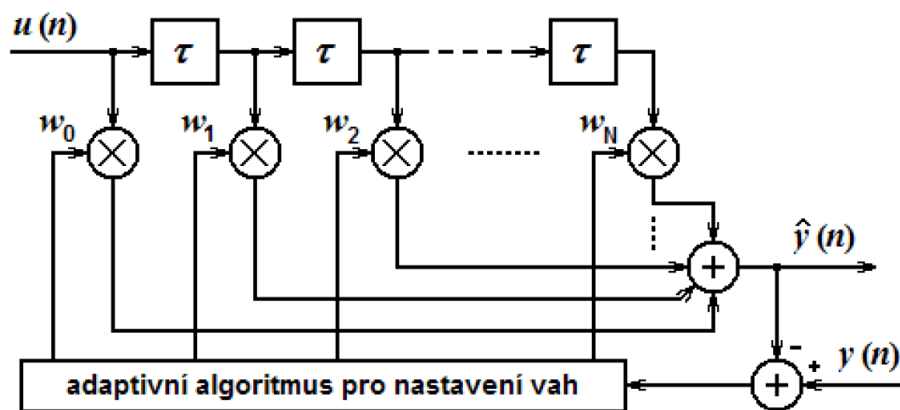
LMS nebo RLS s transversálním filtrem

Jedná se o jedno z nejpoužívanějších zapojení ekvalizérů. Filtr se skládá z několika zpozdovacích členů, každý se zpožděním τ .



Obr. 1.5: Základní rozdělení adaptivních ekvalizérů podle parametrů.[1]

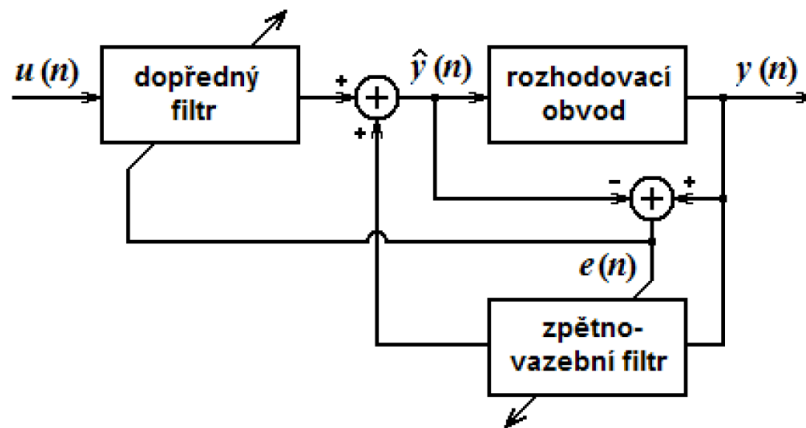
Vstupující signál $u(n)$ odpovídá vyslané tréninkové sekvenci a přidanému zkreslení. Váhové koeficienty jednotlivých pozic filtrů w_n jsou nastavovány pomocí adaptivního algoritmu. Nejčastěji se používá LMS nebo RLS. Tento algoritmus je řízený chybovým signálem, ten je výsledkem odečítání výstupu filtru $\hat{y}(n)$ a trénovací posloupnosti $y(n)$. Po dosažení optimálního nastavení vah filtrů, se hodnoty vah zafixují v algoritmu a ekvalizér poté může pracovat v režimu sledování[1].



Obr. 1.6: Blokové schéma lineárního ekvalizéru s transversálním filtrem[1].

Ekvalizér se zpětnou rozhodovací vazbou (DFE)

Tento ekvalizér spadá do skupiny nelineárních ekvalizérů, kde je využíváno předchozích detekovaných symbolů k eliminaci mezisymbolových přeslechů v symbolu, který je právě přijímán. Je zde využito dvou lineárních filtrů: dopředný a zpětovazební. Nelinearita tohoto zapojení vychází z nelinearity rozhodovacího obvodu z jeho výstupu je právě zavedená zpětná vazba do zpětovazebního filtru. Samotná funkce filtru vyplývá z faktu, že pokud známe symbol na výstupu rozhodovacího obvodu, získáme pomocí správně nastaveného zpětovazebního filtru mezisymbolové přeslechy, které budou ovlivňovat následující symbol a odečíst je od něho. Takže se oba adaptivní filtry nastavují na základě chybového signálu $e(n)$, který je získáván odečítáním kombinace obou výstupů z filtrů. U dopředného filtru je vstupní signál vždy zkreslen zkreslením z přenosového kanálu, ale snaží se přizpůsobit na základě vyhodnocování zpětovazebního filtru. Pokud porovnáme jednoduchý lineární ekvalizér s DFE ekvalizérem, tak DFE je z funkčního hlediska lepší, protože není citlivý na šum a také funguje v případě, že se v amplitudovém spektru nachází nulové hodnoty. Naopak hlavní nevýhoda je, že pokud chybně detekovaný symbol vstoupí do zpětovazebního filtru, dojde tím k chybnému detekování mezisymbolových přeslechů a to zvýší pravděpodobnost chyby při detekování několika následujících symbolů a tím vznikne shluková chyba[1].



Obr. 1.7: Blokové schéma nelineárního ekvalizéru se zpětovazebním filtrem[1].

2 PRAKTICKÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

2.1 Modely přenosového systému s ekvalizací

Prvním úkolem praktické části této diplomové práce bylo navrhnout a vytvořit schéma přenosového systému v programu Simulink, který bude obsahovat tyto funkční bloky:

- Modulace 16-QAM
- Vícecestné šíření na komunikačním kanálu, s přidáním šumu
- Několik typů ekvalizérů
- Zobrazování I/O signálů a výpočet chybovosti

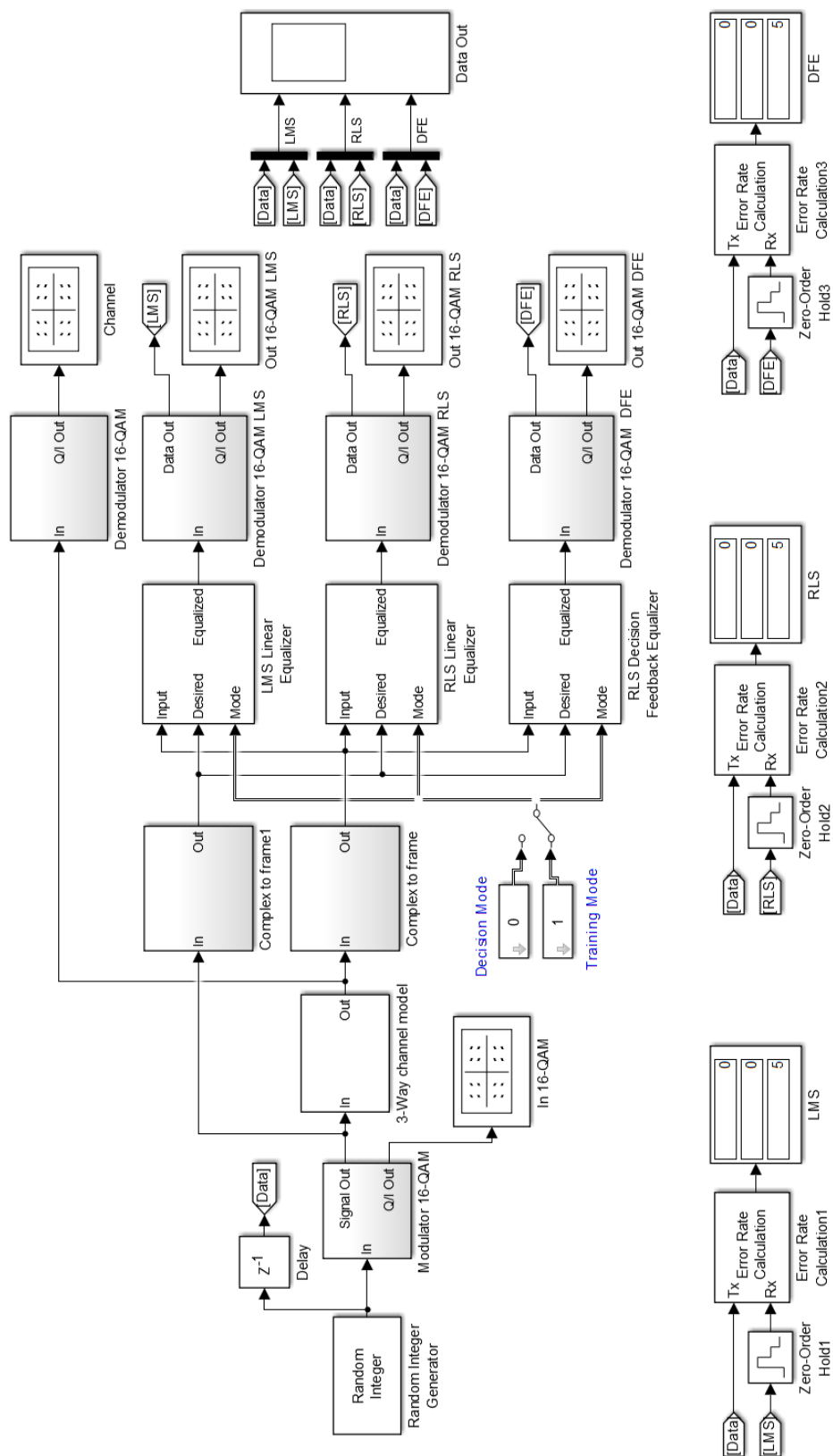
Každý přenosový systém se dá v základu rozdělit do tří základních částí: Na jedné straně se nachází vysílač, do kterého je přiváděn datový signál, který je potřeba přenést. Zde dále dochází k úpravě signálu tak, aby bylo možné tato data bezproblémově přenést, úpravou signálu míníme modulaci (v našem případě 16-QAM) a dále předání signálu na přenosový kanál. Přenosový kanál je další částí přenosového systému, kde dochází k přenosu od vysílače k přijímači, ovšem na přenosovém kanálu dochází ve většině případů ke zkreslení přenášeného signálu. Po průchodu přenosovým kanálem je proto potřeba signál vhodnými technikami opravit a dále zpracovat. Výstupní signál z přijímače by měl co nejvíce odpovídat datům vstupujícím do vysílače.



Obr. 2.1: Blokové schéma přenosového systému.

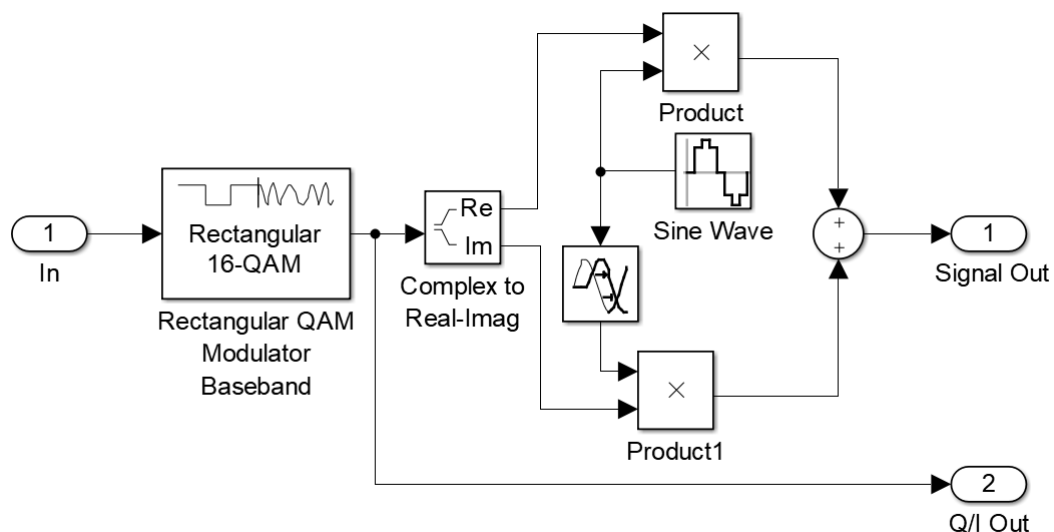
2.1.1 Popis systému

Jako zdroj dat je použit náhodný generátor dat, který generuje diskrétní signál v rozsahu hodnot 0 až 15. Tento signál poté vstupuje do vysílače a tam je dále zpracováván.



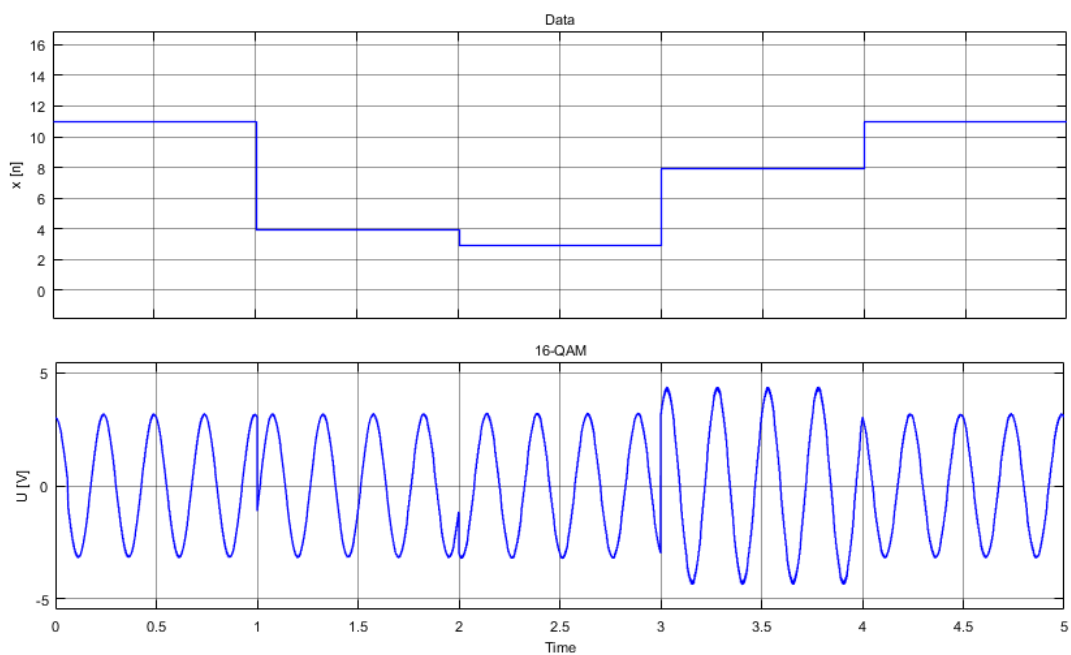
Obr. 2.2: Blokové schéma simulace.[6]

2.1.2 Model vysílače



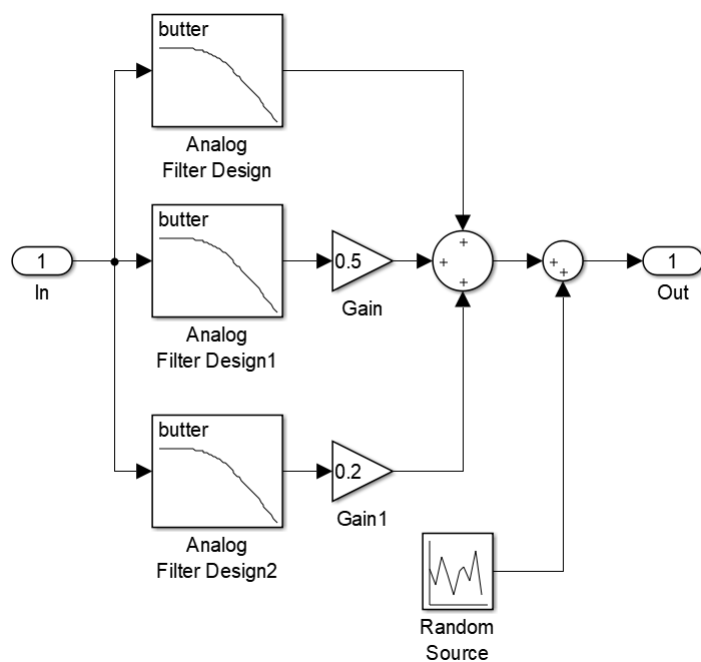
Obr. 2.3: Blokové schéma zapojení vysílače.

Vstupní data jsou přiváděna do modulátoru, kde je signál modulovaný 16-QAM modulací v základním pásmu. To znamená, že na výstupu dostáváme komplexní signál, který je potřeba ještě namodulovat na nosnou frekvenci. To se provádí tak, že se signál rozdělí na reálnou a imaginární složku signálu. Reálná složka se vynásobí nosným signálem z generátoru a u imaginární složky musí být nosná o $\frac{\pi}{4}$ posunuta. Tyto signály se poté sečtou a tím dostáváme 16-QAM modulovaný signál na nosné. Nosný signál musí mít několikanásobně větší periodu, než datový signál. Na následujícím obrázku je signál generovaný zdrojem dat a časový průběh namodulovaného signálu 16-QAM na nosnou tedy, výstup z vysílače. Tento signál je dále posílán přes přenosový kanál.



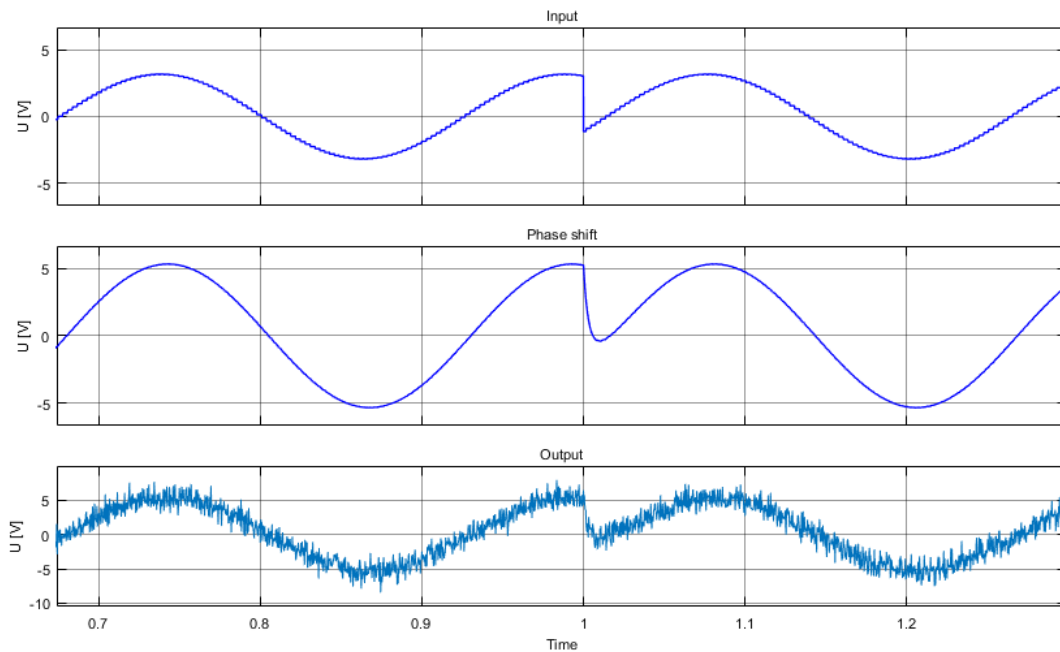
Obr. 2.4: Časové průběhy v modelu vysílače.

2.1.3 Model přenosového kanálu



Obr. 2.5: Blokové schéma zapojení přenosového kanálu.

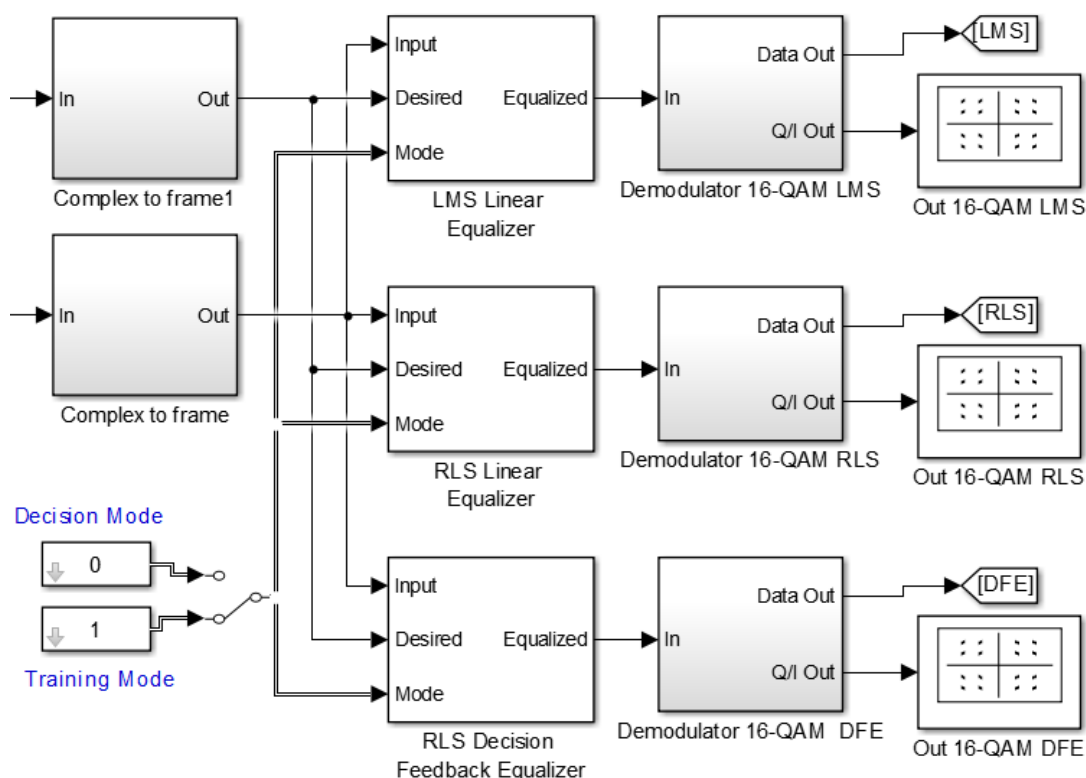
Tento model přenosového kanálu znázorňuje zjednodušené vícecestné šíření signálu, ke kterému dochází například při bezdrátovém vysílání. Při návrhu byl brán v potaz v co nejjednodušší model, který znázorňuje tři cesty šíření. První cesta šíření je přímá, u které dochází pouze k malému posunu fáze, tento signál je však nejsilnější. Další dvě cesty znázorňují signály, které jsou přijaty po odrazu od překážky, tím pádem dochází k většímu posunu fází obou signálů oproti přímé trase a také mají tyto odražené signály menší amplitudu než u přímé cesty. Pro simulaci takového scénáře je použito třech filtrů. Všechny filtry jsou dolní propusti prvního řádu s aproximací podle Butterwortha. Každý z filtrů znázorňuje posun fáze na jedné trase. U odrazů je ještě použito útlumových článků pro snížení amplitudy signálu, čímž se docílí efektu, že tyto odražené signály se na přijmací straně projeví méně než přímá trasa. Dalším důležitým aspektem při přenosu je vliv šumu. Proto je zde přidáván do trasy zdroj generující Gaussovský šum. Následující obrázek znázorňuje časové průběhy na vstupu přenosového kanálu, dále pak součet všech tří cest vícecestného šíření, kde je vidět patrný rozdíl fázového posunu, což je způsobeno právě součtem tří cest a poslední zobrazuje přidání šumu do fázově posunutého signálu.



Obr. 2.6: Časové průběhy v modelu přenosového kanálu.

2.1.4 Model přijímače

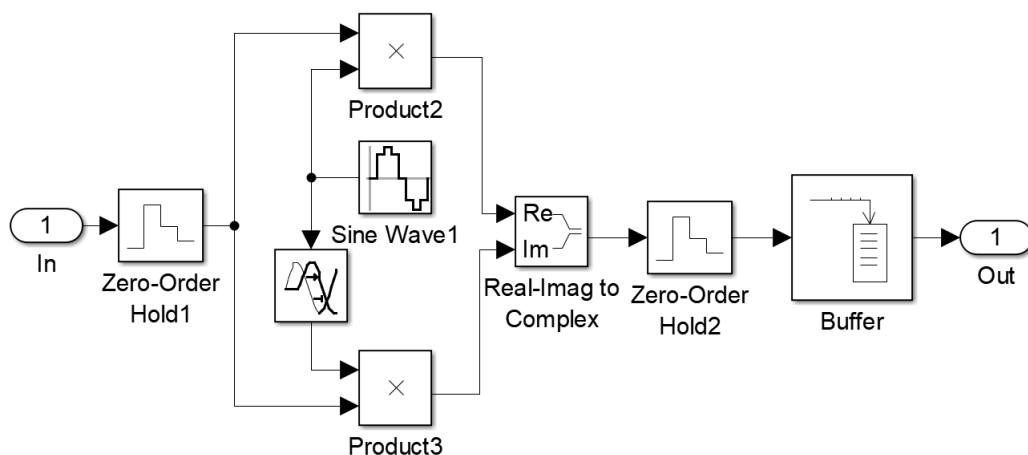
V této části se nachází tři shodné přijímače s tím rozdílem, že každý z nich má použitý jiný typ ekvalizéru pro opravu přijímaného signálu. Proto v následujícím textu bude popsán jen jeden přijímač.



Obr. 2.7: Blokové schéma zapojení přijímače.

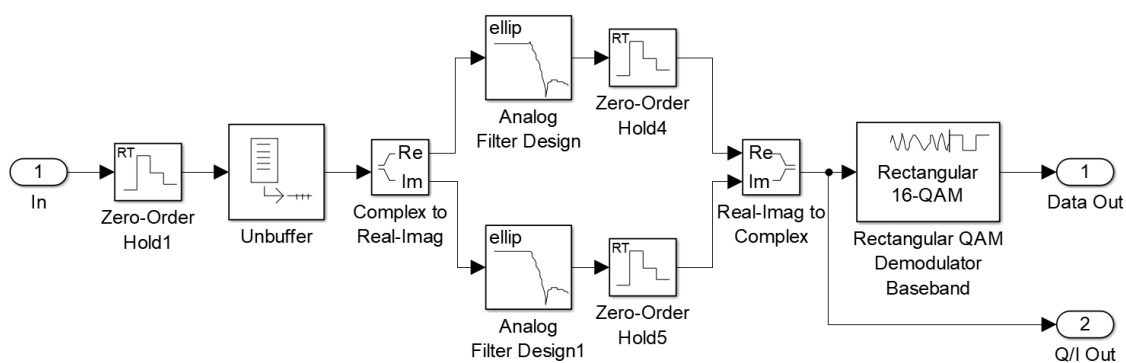
První z bloků, hned za přenosovým kanálem, je vstupní blok pro obnovu nosného signálu a transformace signálu do rámců, které poté ekvalizér zpracuje. Tento blok je použit dvakrát a to ještě pro trénování ekvalizéru, kde signál neprochází přenosovým kanálem, ale nezkreslený je přiveden na vstup ekvalizéru a pomocí něj se ekvalizér trénuje.

V těchto blocích se signál navzorkuje a rozdělí do dvou násobiček signálů, kde se tyto signály násobí s nosnou frekvencí, stejně jako ve vysílači, z toho je získán opět komplexní signál, který se poté navzorkuje a uloží do mezipaměti, tato mezipaměť tvoří rámcový zdroj dat pro ekvalizér.



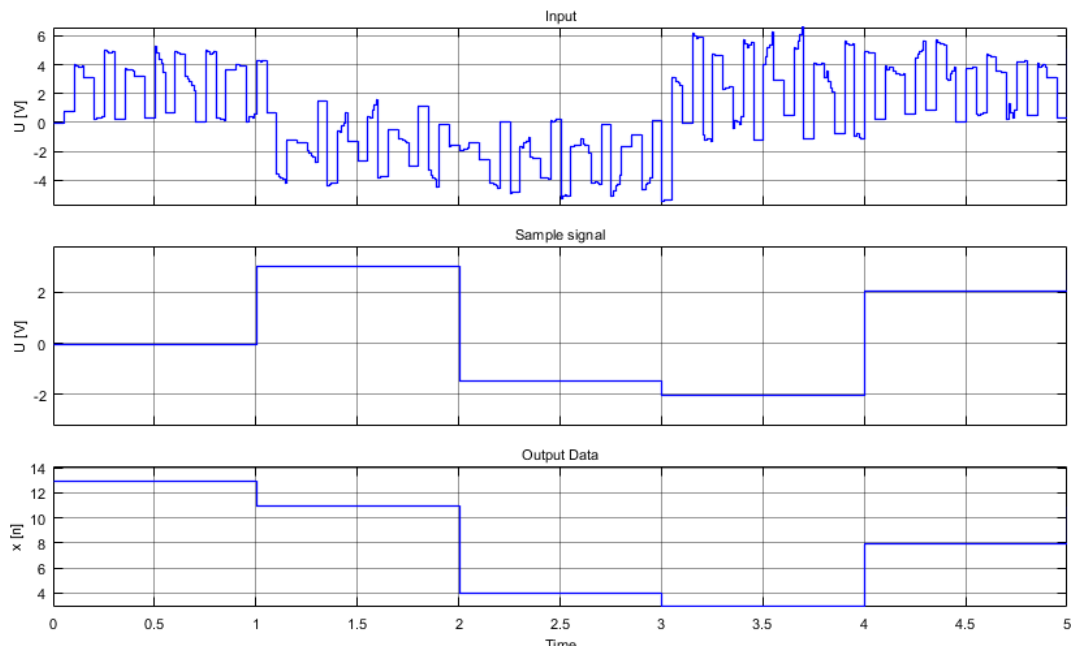
Obr. 2.8: Blokové schéma zapojení vstupního bloku přijímače.

Za výstupem ekvalizéru je signál opět přiveden do mezipaměti, kde se převede z rámců do časové roviny a je rozdělen na reálnou a imaginární složku. Obě tyto složky pak prochází přes dolní propusti, kde je odstraněna nosná frekvence a dále je signál navzorkován a přiveden na vstup demodulátoru, kde se 16-QAM signál demoduluje. Na výstupu pak dostáváme datovou posloupnost stejnou, jako data generovaná.



Obr. 2.9: Blokové schéma zapojení vstupního bloku přijímače.

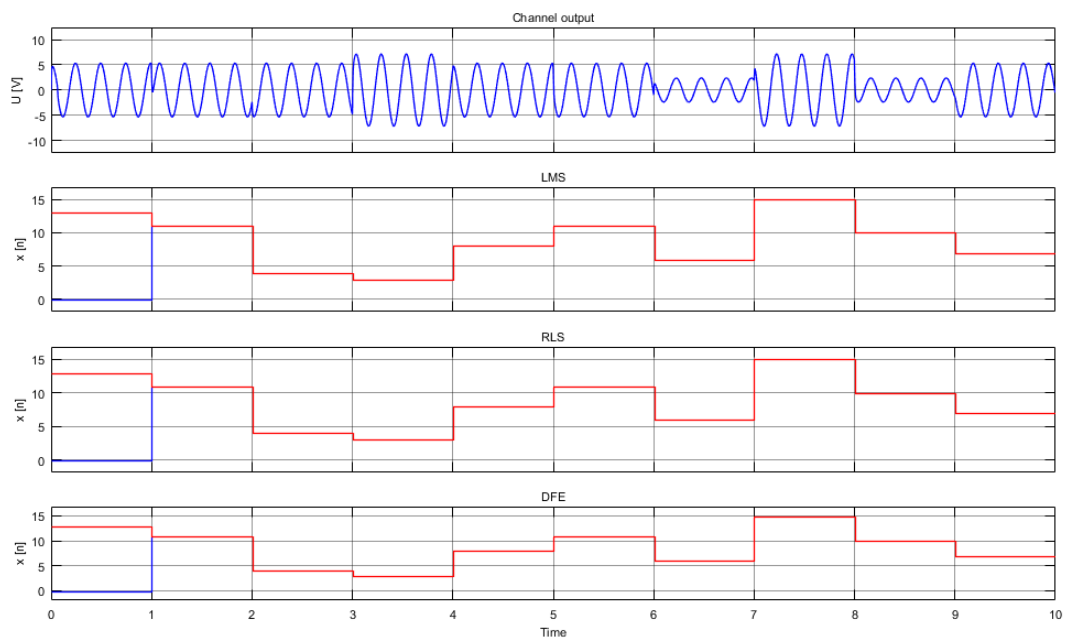
Na následujícím obrázku jsou vidět časové průběhy z demodulátoru. První průběh zobrazuje navzorkovaný signál před vstupem do dolní propusti. Na druhém průběhu se už se jedná o vyfiltrovaný signál od nosné frekvence a navzorkovaný podle periody dat. Poslední časový průběh znázorňuje demodulovanou sekvenci dat, které byly posílány přes přenosový model.



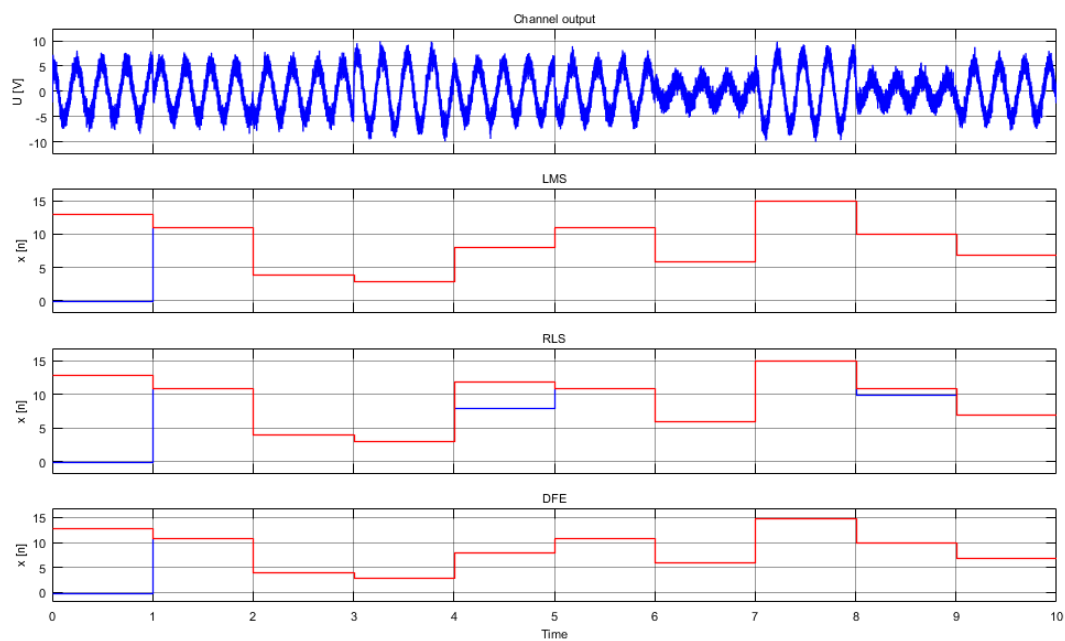
Obr. 2.10: Časové průběhy v demodulátoru přijímače.

2.1.5 Výsledky použitých metod ekvalizace

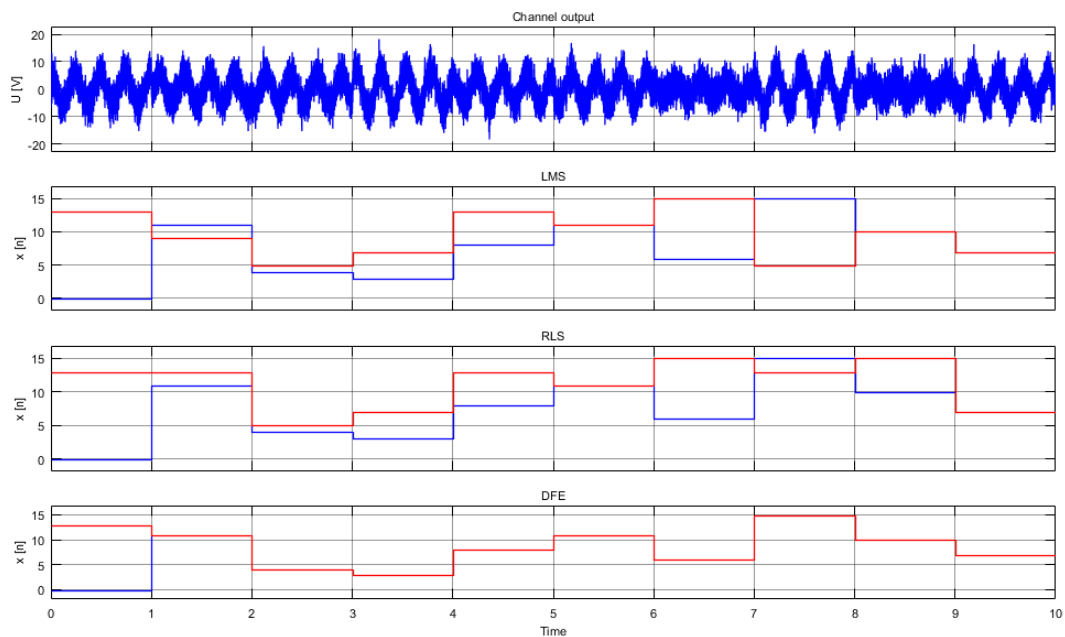
V této části jsou zobrazeny výsledky a rozdíly použitých ekvalizérů. Pro přehlednou ukázkou je zde vyobrazeno několik scénářů s rozdílnými hodnotami přidávaného šumu na kanálu. Na následujících obrázcích jsou znázorněny vždy čtyři časové průběhy pod sebou. První časový průběh zobrazuje vstup do přijímače, tedy jak je signál procházející přes přenosový kanál zarušen šumem. Následující časové průběhy znázorňují vyslanou a přijatou posloupnost dat, tyto průběhy jsou multiplexovány do jednoho okna pro lepší přehlednost. Modrý průběh jsou vyslaná data a červený jsou data přijatá po korekci ekvalizérem. Na prvním obrázku je sekvence dat bez přidání šumu, na přenosovém kanálu dochází pouze k fázovému posunu díky vícecestnému šíření. Druhý obrázek už obsahuje šum a to Gaussovský šum o rozptýlu 1. Zde je vidět několik chyb u ekvalizéru RLS. A poslední obrázek znázorňuje značně zarušený přenosový kanál Gaussovským šumem o rozptýlu 5 a neschopnost lineárních ekvalizérů opravovat chyby, narozdíl od DFE, který díky zpětnovazebnímu filtru stále dokáže signál opravit.



Obr. 2.11: Časové průběhy na výstupu přijmače při rozptylu šumu 0.

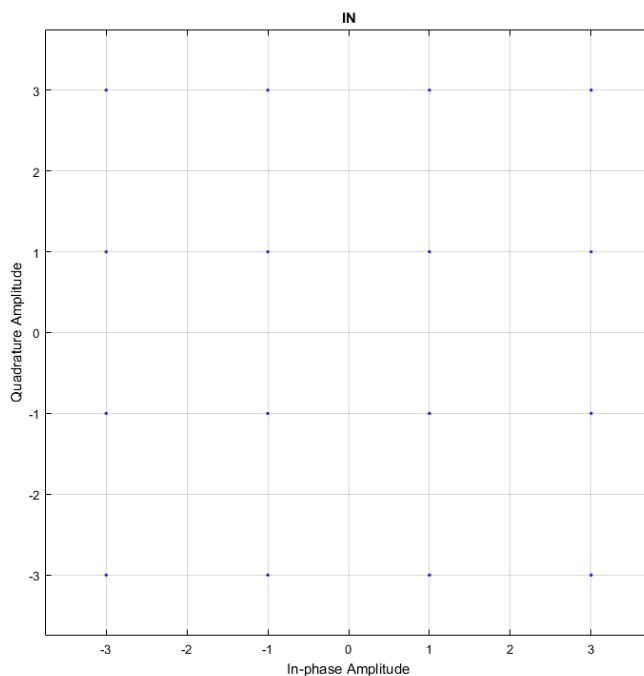


Obr. 2.12: Časové průběhy na výstupu přijmače při rozptylu šumu 1.

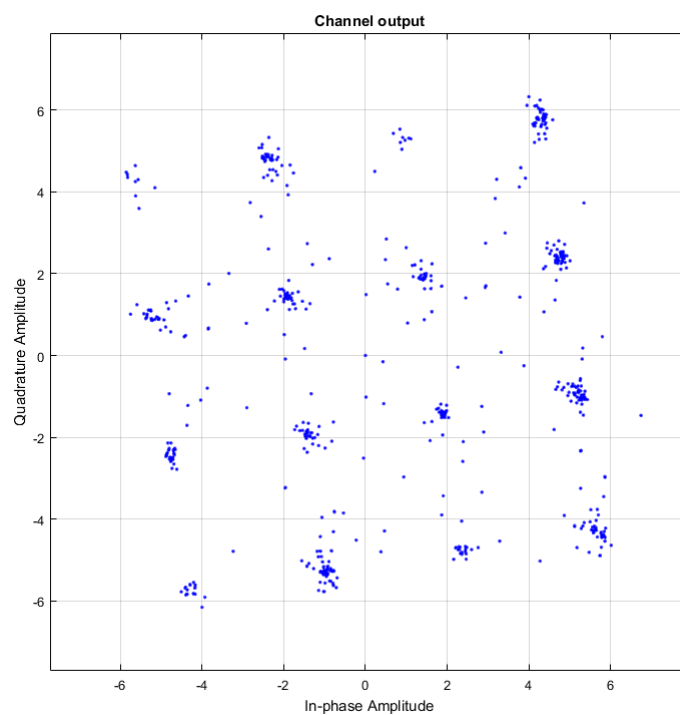


Obr. 2.13: Časové průběhy na výstupu přijmače při rozptýlu šumu 5.

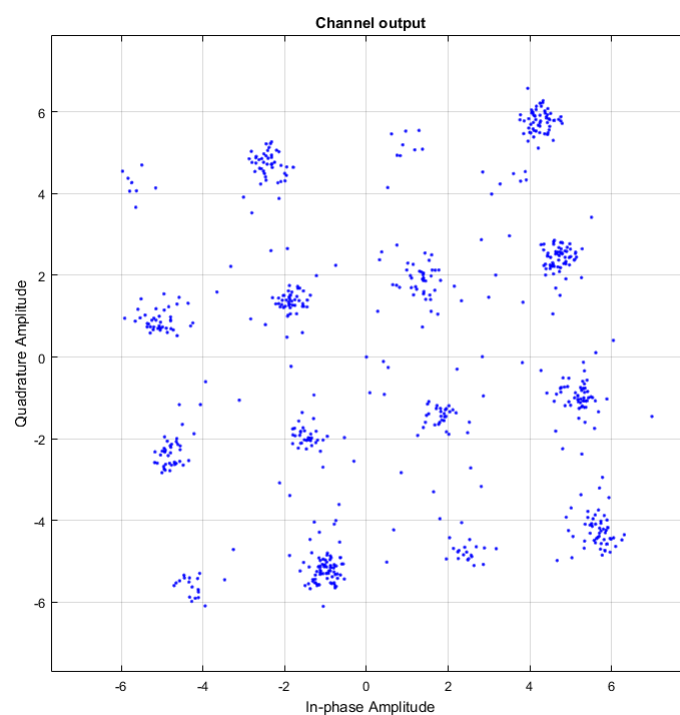
Dále jsou zobrazeny konstelační diagramy vyslaného signálu, přijatého signálu bez ekvalizace a diagramy po opravě jednotlivých ekvalizérů. Opět pro různé hodnoty šumu.



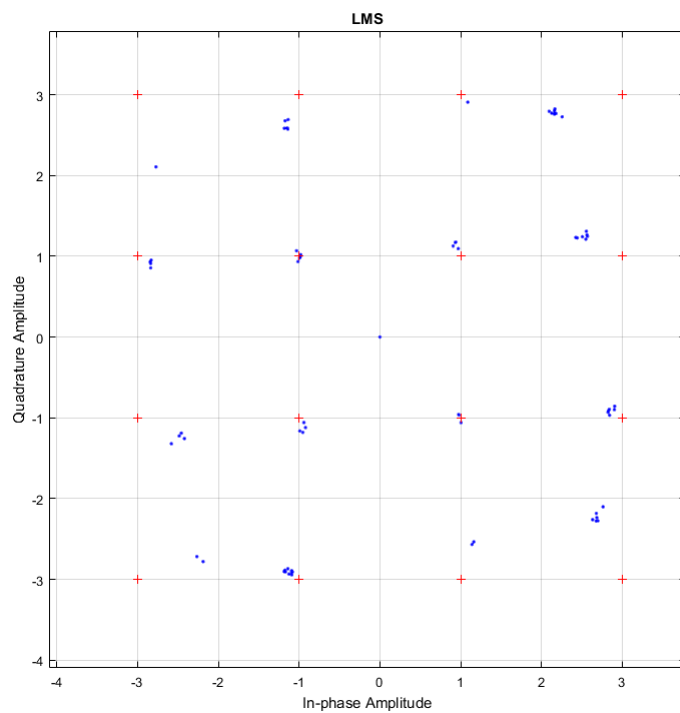
Obr. 2.14: Konstelační diagram vyslaného signálu.



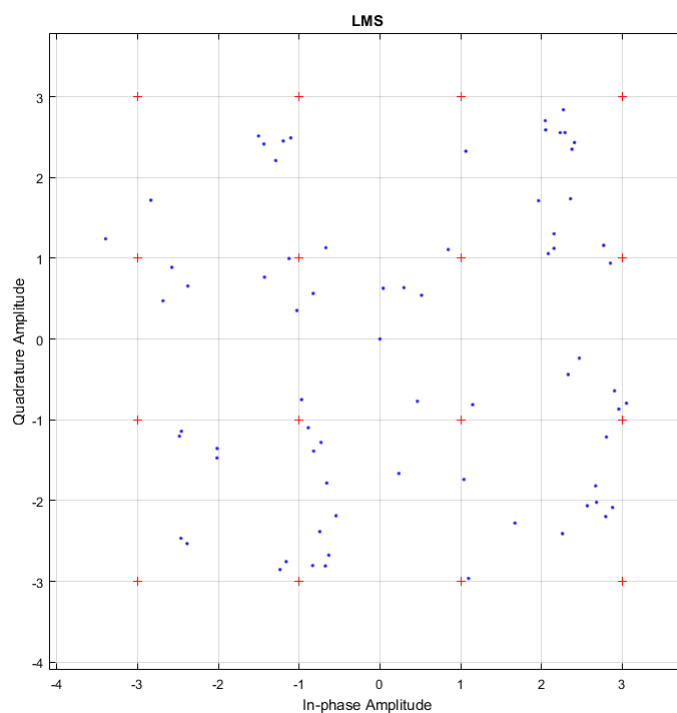
Obr. 2.15: Konstelační diagram přijatého signálu, bez ekvalizace, při rozptylu šumu 0.



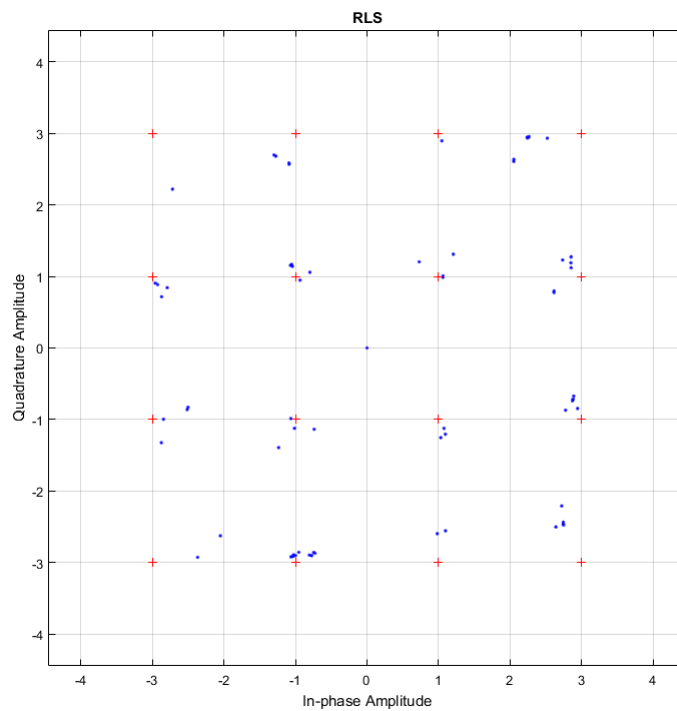
Obr. 2.16: Konstelační diagram přijatého signálu, bez ekvalizace, při rozptylu šumu 1.



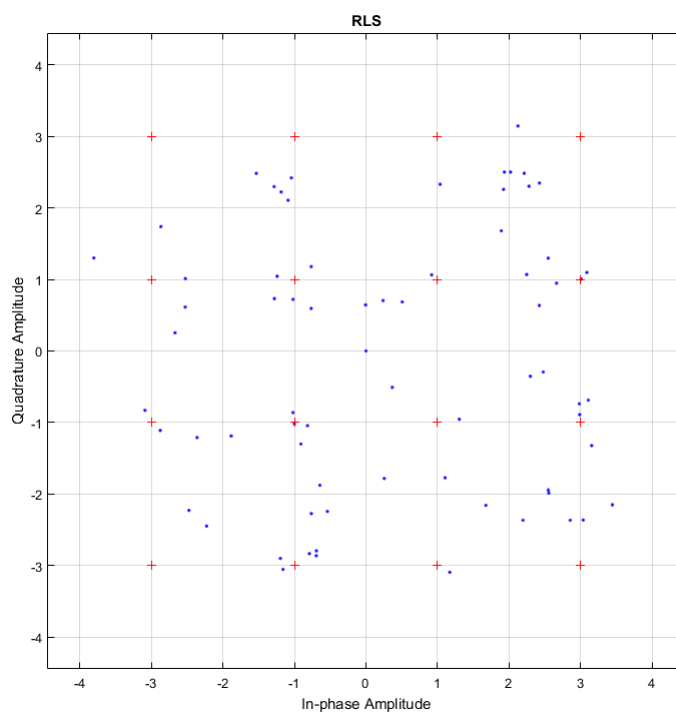
Obr. 2.17: Konstelační diagram přijatého signálu po ekvalizaci LMS při rozptylu šumu 0.



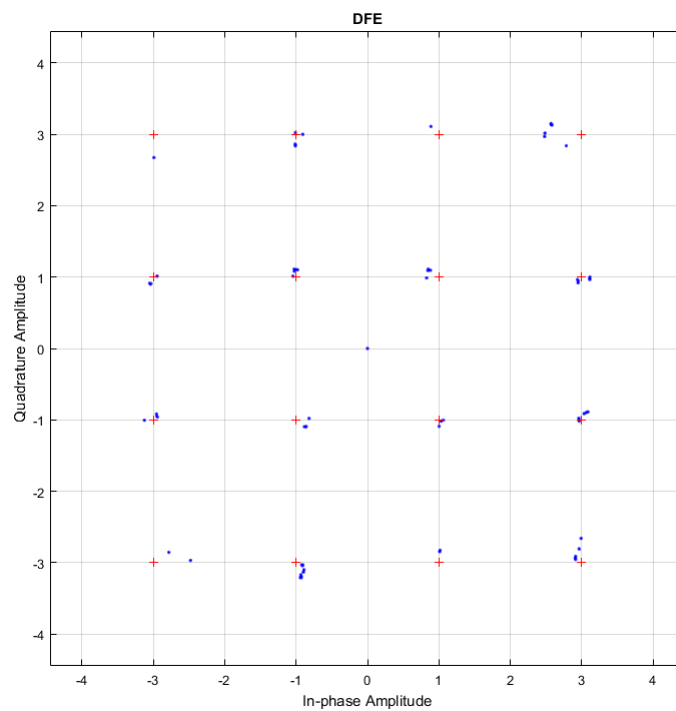
Obr. 2.18: Konstelační diagram přijatého signálu po ekvalizaci LMS při rozptylu šumu 1.



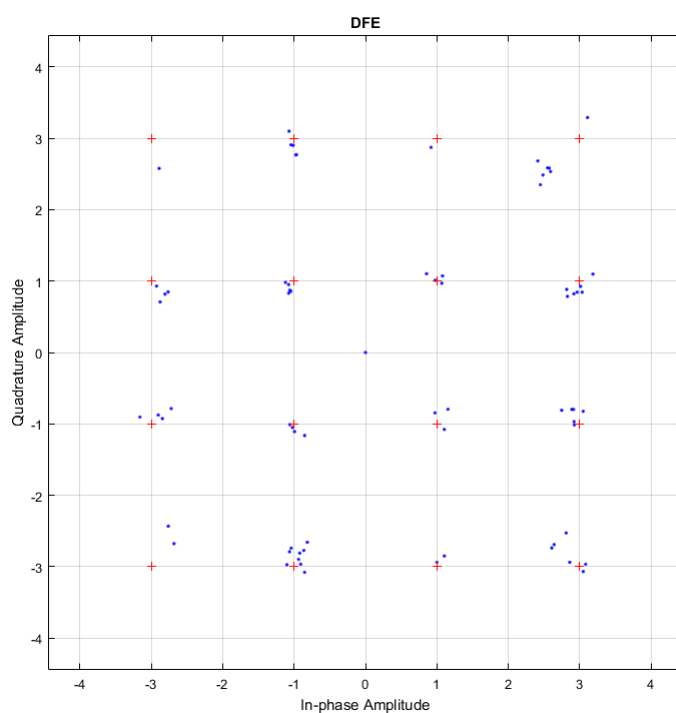
Obr. 2.19: Konstelační diagram přijatého signálu po ekvalizaci RLS při rozptylu šumu 0.



Obr. 2.20: Konstelační diagram přijatého signálu po ekvalizaci RLS při rozptylu šumu 1.



Obr. 2.21: Konstelační diagram přijatého signálu po ekvalizaci DFE při rozptylu šumu 0.

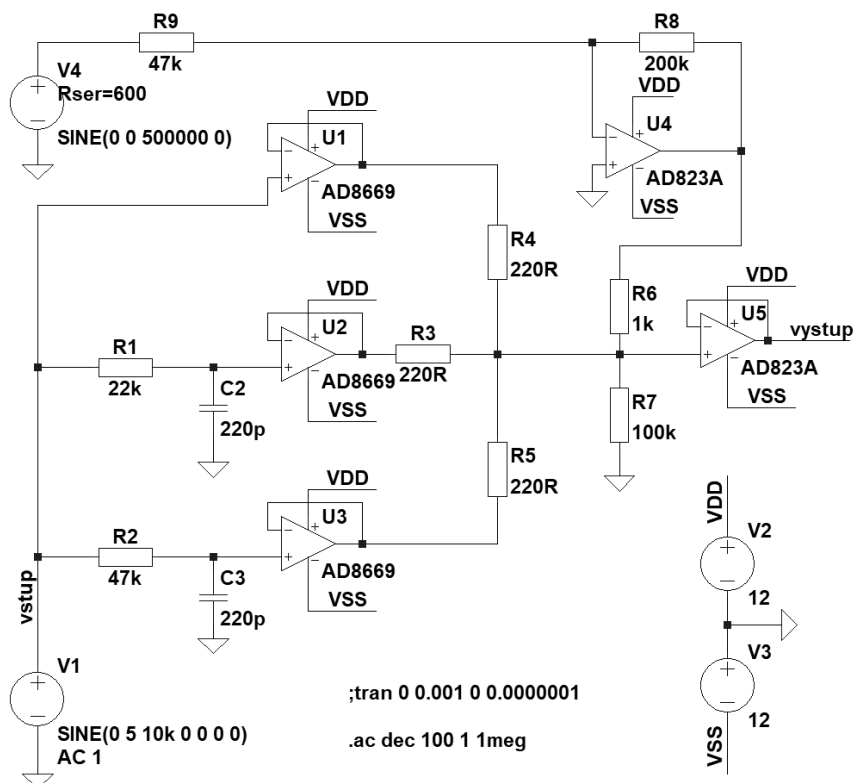


Obr. 2.22: Konstelační diagram přijatého signálu po ekvalizaci DFE při rozptylu šumu 1.

2.2 Laboratorní přípravek

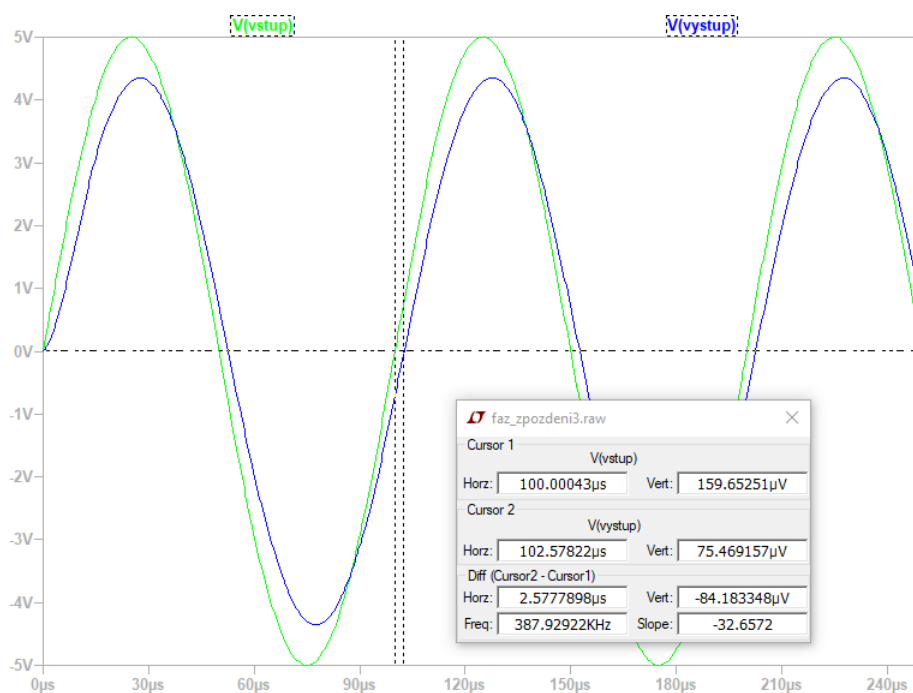
2.2.1 Návrh a simulace přípravku

Dalším úkolem bylo navrhnout a nasimulovat reálné zapojení přenosového kanálu, který bude odpovídat přenosu signálu při vícecestném šíření. V tomto přenosovém kanálu jsou realizovány tři přenosové cesty s různými fázovými zpožděními a útlumy. A také možnost přičítání bílého šumu z funkčního generátoru do přenášeného signálu. K návrhu celkového zapojení a simulaci byl použit program LTspiceXVII.

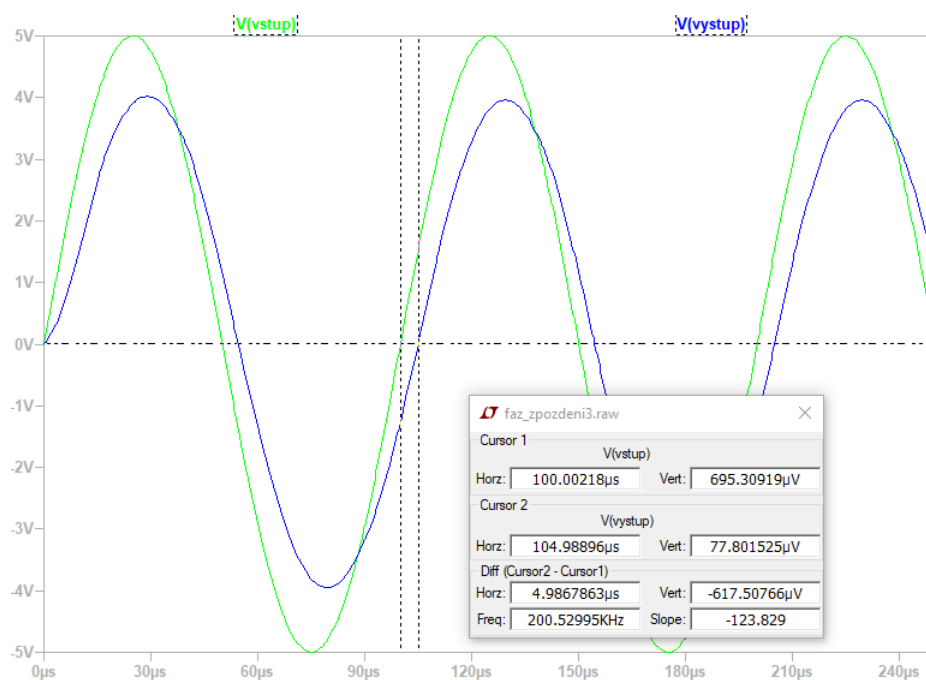


Obr. 2.23: Schéma zapojení přenosového kanálu.[7][8]

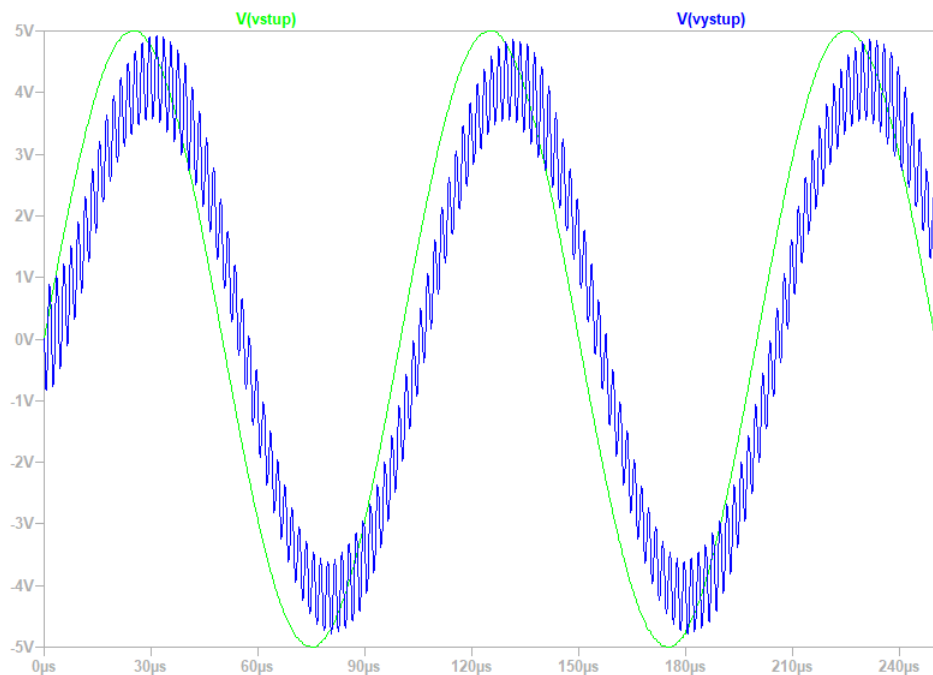
Signál vedený přes U1 v tomto případě znázorňuje přímou cestu a proto nemá žádné fázové zpoždění signálu. Signál vedený přes U2 a U3 znázorňuje první odraženou a druhou odraženou signálovou cestu, čímž je simulován odraz signálu od překážky, což způsobuje určité fázové zpoždění a útlum signálu. Fázových zpoždění a útlumů je docíleno pomocí RC článků zapojených jako dolní propusti. Tyto dolní propusti mají nastavenou mezní frekvenci tak, aby docházelo k malému útlumu signálu a částečnému posunutí fáze. Dále jsou tyto signály sečteny a přivedeny na výstupní sledovač. K fázově zpožděným signálům, lze přidat šum z funkčního generátoru, který je před přičtením k výstupu ještě čtyřikrát zesílen.



Obr. 2.24: Simulace časových průběhů vstupního a výstupního signálu po průchodu přímé a první odražené cesty.



Obr. 2.25: Simulace časových průběhů vstupního a výstupního signálu po průchodu přímé a druhé odražené cesty.



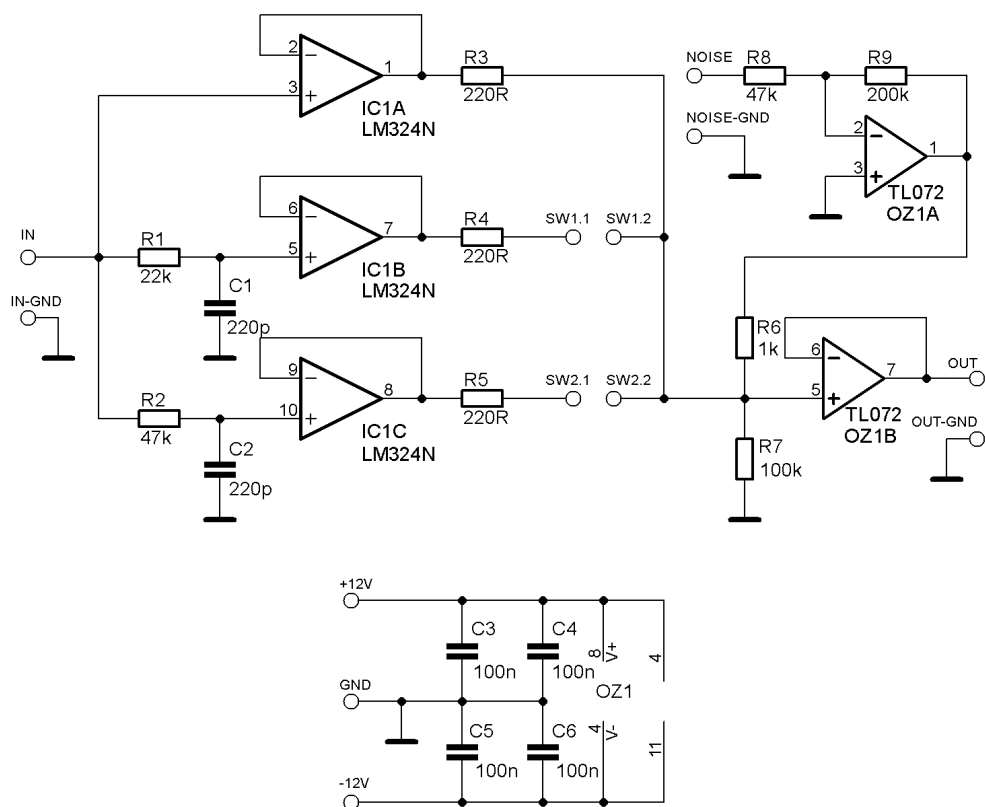
Obr. 2.26: Simulace časových průběhů vstupního a výstupního signálu všech tří cest s přidaným rušivým signálem o efektivní hodnotě 1V.

Sledovače U1, U2 a U3 jsou v obvodu proto, aby došlo k oddělení jednotlivých filtrů a výstupní sledovač U5 z důvodu přizpůsobení výstupu pro připojování externích periférií. Zdroj bílého šumu je v simulaci nahrazen generátorem sinusového průběhu o frekvenci 500 kHz, což je postačující pro ukázkou přičítání rušivého signálu.

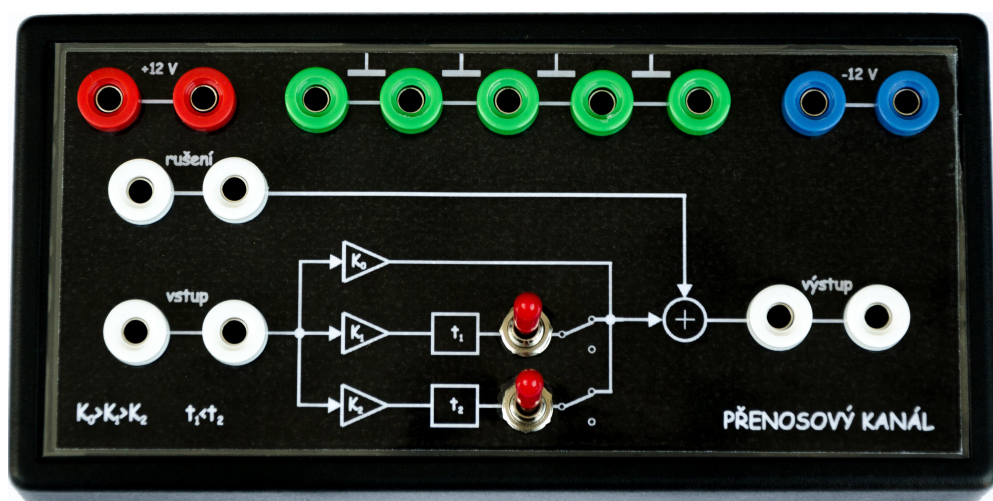
2.2.2 Návrh DPS a konstrukce přípravku

Schéma zapojení celého přípravku odpovídá odsimulovanému obvodu, avšak do první odražené a druhé odražené cesty jsou do série přidány spínače. To, aby byla možnost volit si různé možnosti šíření signálu, kde je přímá cesta vždy spojena s výstupem a připojováním dalších cest se zvyšoval fázový posun a snižovala amplituda signálu na výstupu. Ve zdrojové části se nachází 100 nF blokovací kondenzátory proti zákmitům na operačních zesilovačích. Přípravek je napájený ze symetrického zdroje ± 12 V. Konstrukce celého přípravku je navržena tak, aby zařízení bylo snadno pochopitelné a ovladatelné. Základ je tvořen dvoudílnou krabičkou z černého plastu o rozměrech 168 x 84 x 36 mm. Uvnitř je umístěna DPS na distančních sloupcích. Na panelu v horní části krabičky se nachází napájecí zdířky. Po krajních částech panelu jsou zdířky pro vstup modulovaného signálu a rušivého signálu a také pro výstup modulovaného signálu. Po celém panelu je přilepený zafóliovaný papír s popisky jednotlivých zdířek a jednoduchým blokovým schématem funkcí přípravku. Všechny

zdířky jsou pro připojení kabelů s banánky o průměru 4 mm.

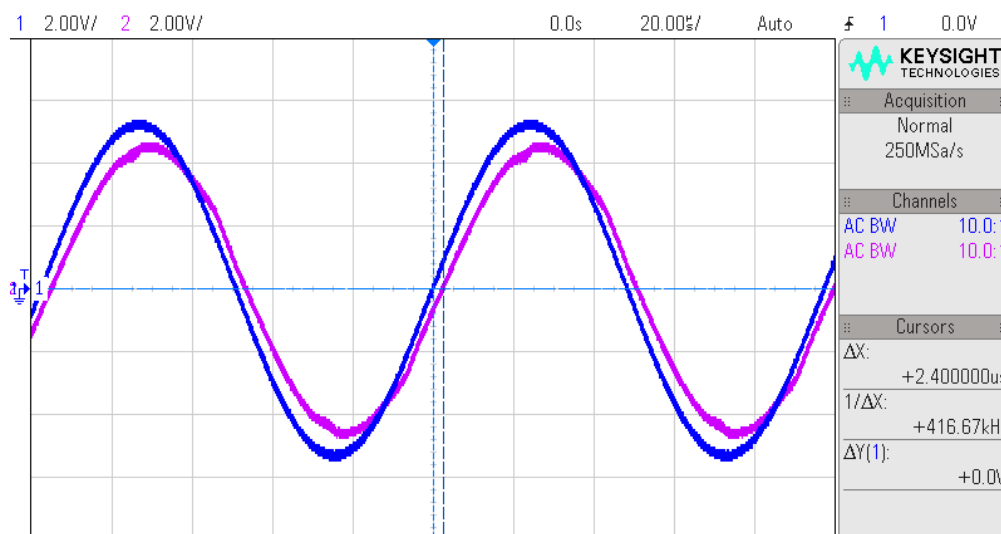


Obr. 2.27: Schéma přenosového kanálu.

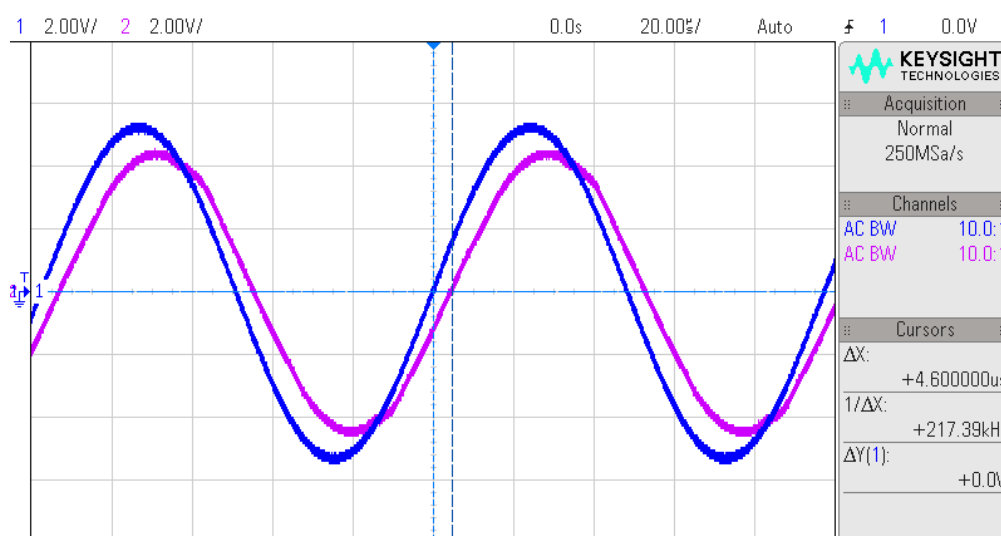


Obr. 2.28: Pohled na panel přenosového kanálu.

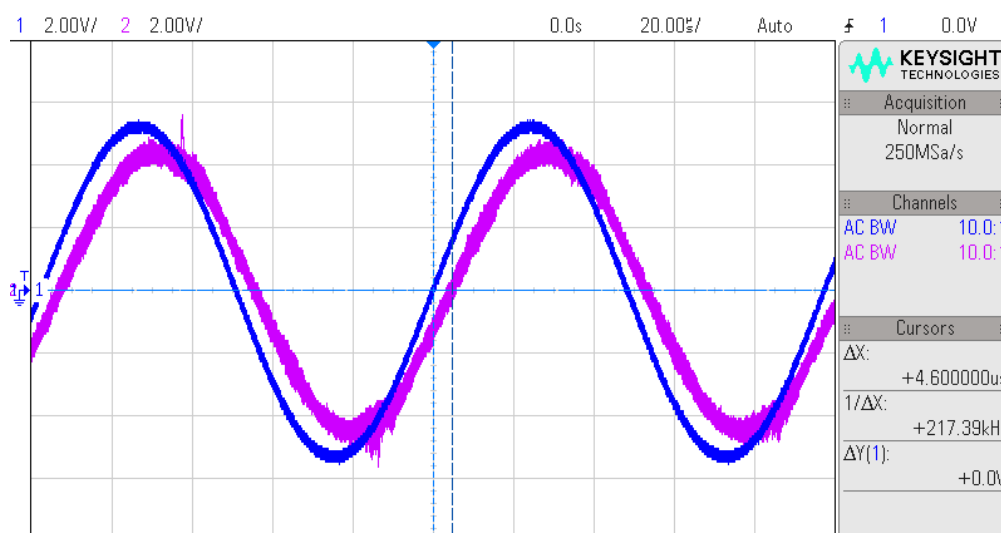
2.2.3 Měření výsledků hotového přípravku



Obr. 2.29: První kanál (modrý) zobrazuje signál na vstupu přípravku, druhý kanál (fialový) signál po průchodu přímou a první odraženou cestou.



Obr. 2.30: První kanál (modrý) zobrazuje signál na vstupu přípravku, druhý kanál (fialový) signál po průchodu přímou a druhou odraženou cestou.

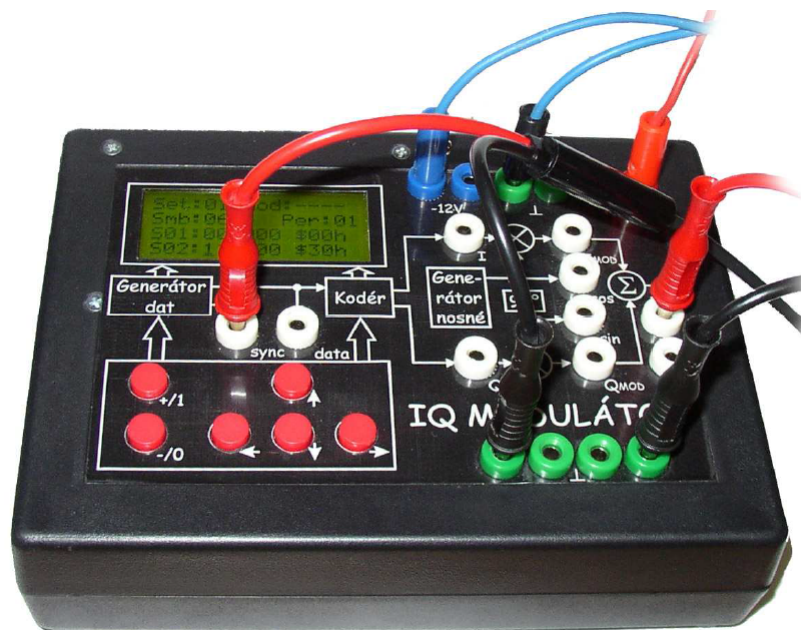


Obr. 2.31: První kanál (modrý) zobrazuje signál na vstupu přípravku, druhý kanál (fialový) signál po průchodu všemi cestami s přidáním rušivého bílého šumu o efektivní hodnotě 1,5 V.

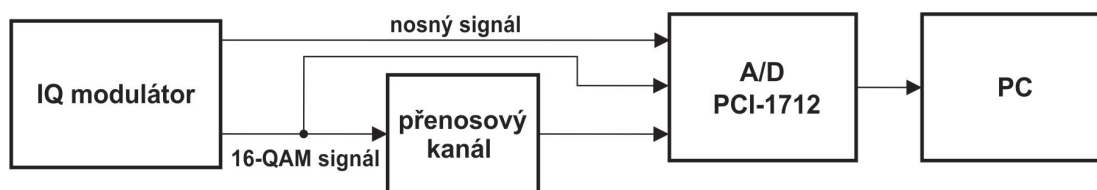
2.3 Nahrávání signálu a zpracování v PC

Následující část zadání pojednává o nahrávání modulovaných signálů do počítače a následném zpracování. Jako zdroj přenášených dat nosného a následně modulovaného signálu je IQ modulátor. Tento přípravek umí generovat uživatelsky volitelnou sekvenci dat, které mohou být modulovány jednou z těchto modulací: BPSK, QPSK, 8PSK, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM. Nosná frekvence je u tohoto přípravku pevně nastavena na 10 kHz, dá se ale nastavit délka trvání datového symbolu v závislosti na počtu period nosného signálu, tím se ale snižuje přenosová rychlost. Pro náš případ nahrání, zpracování a následnou demodulaci signálu je použita 16-QAM modulace s vyslanými osmi symboly datového signálu o posloupnosti: 1, 3, 10, 14, 7, 5, 12, 8 - dekadicky zapsáno. A délka trvání datového symbolu je nastavena na dvě periody nosného signálu. Takto modulovaný signál je přiveden na vstup přenosového kanálu. Přenosový kanál má připojené všechny tři přenosové cesty a na výstupu kanálu poté získáme součet modulovaných signálů při vícecestném šíření. Takto modifikovaný signál z přenosového kanálu můžeme nahrát do počítače.[9]

Pro správnou funkci ekvalizéru a demodulátoru je potřeba nahrávat do počítače tři signály. Prvním je nosná frekvence, aby bylo možné demodulovat modulovaný signál, dále pak modulovaný signál před přenosovým kanálem, aby se měl čím natrénovat ekvalizér a posledním signálem je právě signál modulovaný, který je ale po průchodu přenosovým kanálem.



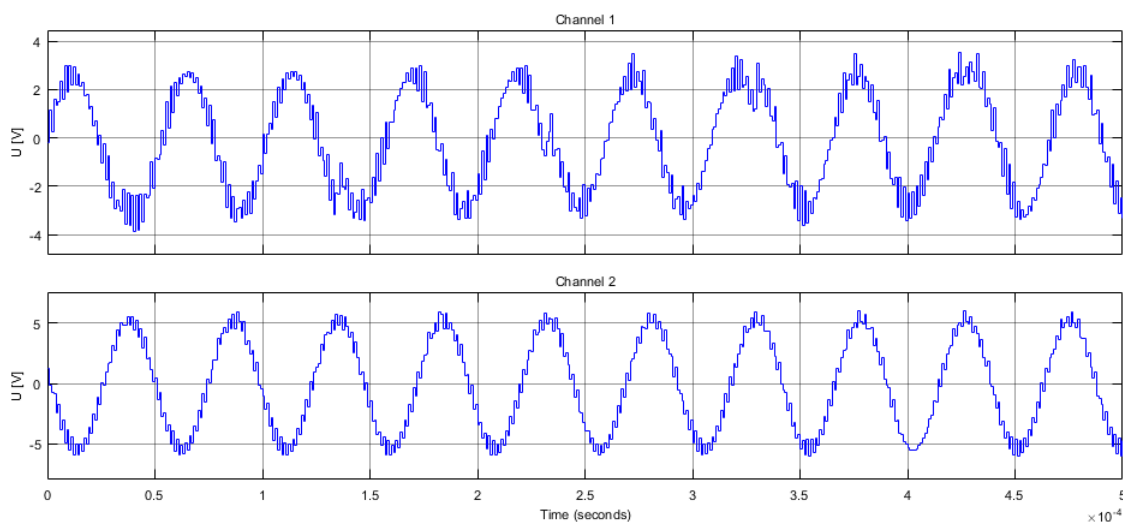
Obr. 2.32: Fotografie použitého IQ modulátoru[5].



Obr. 2.33: Blokové schéma nahrávání signálů do počítače.

Pro nahrávání signálu do počítače je použita A/D převodníková karta ADVANTECH PCI-1712. Tato karta má 16 analogových vstupů a udává maximální vzorkovací frekvenci 1 MS/s. Tato vzorkovací frekvence platí pouze v případě, že je využíváno pouze jednoho vstupu. V tomto případě, kdy bylo použito tří vstupů byla vzorkovací frekvence 333,33 kS/s. V této části započaly první problémy s nahráváním signálů do počítače. Jelikož bylo potřeba navzorkovat signál o frekvenci 10 kHz, tak po jednoduchém výpočtu vzorkovací frekvence vychází na 33,33 vzorků na periodu. Taková vzorkovací frekvence není plně dostačující pro vzorkování 16-QAM modulaného signálu. Všechny tři signály měly být nahrávány do počítače, konkrétně do programu Simulink v reálném čase, a tam dále zpracovávány. Jak bylo následně zjištěno, tak Data Acquisition Toolbox v prostředí programu Simulink, který má v reálném čase zobrazovat signály na vstupech A/D převodníkové karty, nezobrazuje zcela správné hodnoty. Po různých změnách nastavení karty a změnách verzí programu Simulink byly výsledky stále stejné. Na vstupech, kde nebyl připojený žádný

signál se z neobjasněných důvodů náhodně objevovaly různé signály, a v případě že se na vstupy připojily signály, které byly potřeba načíst, tak došlo k sečtení těchto dvou signálů a tím vznikaly deformované signály, které nemohly být nadále nijak zpracovávány. Tato chyba se opakovala na všech vstupech karty a to, i když byla karta vyměněna za jinou stejného typu.



Obr. 2.34: Časové průběhy nahrávání signálů v reálném čase při použití dvou kanálů A/D převodníkové karty.

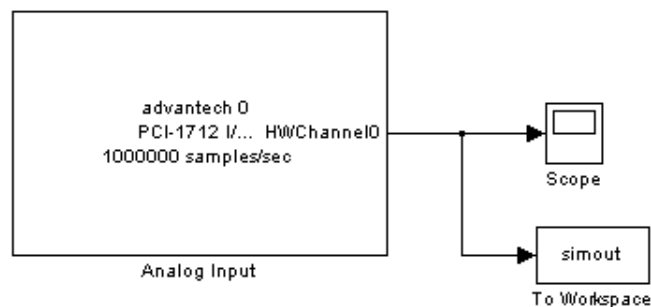
Dalším pokusem, kterým měly být odstraněny problémy s nežádoucími signály a zvýšení vzorkovací frekvence, mělo být použití tří stejných typů karet PCI-1712. Každá z těchto karet měla jedním vstupem načítat jeden signál, tím měly být vyřešeny problémy s malou vzorkovací frekvencí a vlivem nežádoucích signálů na vstupech. Signály byly nahrávány v reálném čase s dostatečnou vzorkovací frekvencí a bez nežádoucích signálů. Vznikly tím ale další problémy v synchronizaci nahrávání průběhů. Spouštění nahrávání u karet se spouštělo náhodně a tím nebylo možné žádným způsobem průběhy synchronizovat ani při použití externího signálu do externího synchronizačního vstupu karet.

Na základě těchto problémů bylo změněno nahrávání signálů z reálného času na nahrávání do souboru. Pro nahrávání do souboru byla použita jedna karta PCI-1712 a jeden její vstup. Postupně se tak nahrají všechny tři signály do tří souborů a následně upraví.

V této fázi, kdy jsou nahrány všechny tři signály ve třech samostatných souborech, je zapotřebí je vzájemně synchronizovat a vložit do jednoho souboru. Zde se ale opět vyskytl problém. Bylo zjištěno, že oscilátor generující nosný signál není stabilní a nemá přesnou frekvenci, která s časem vzrůstá o desítky hertzů v závislosti ohřevu

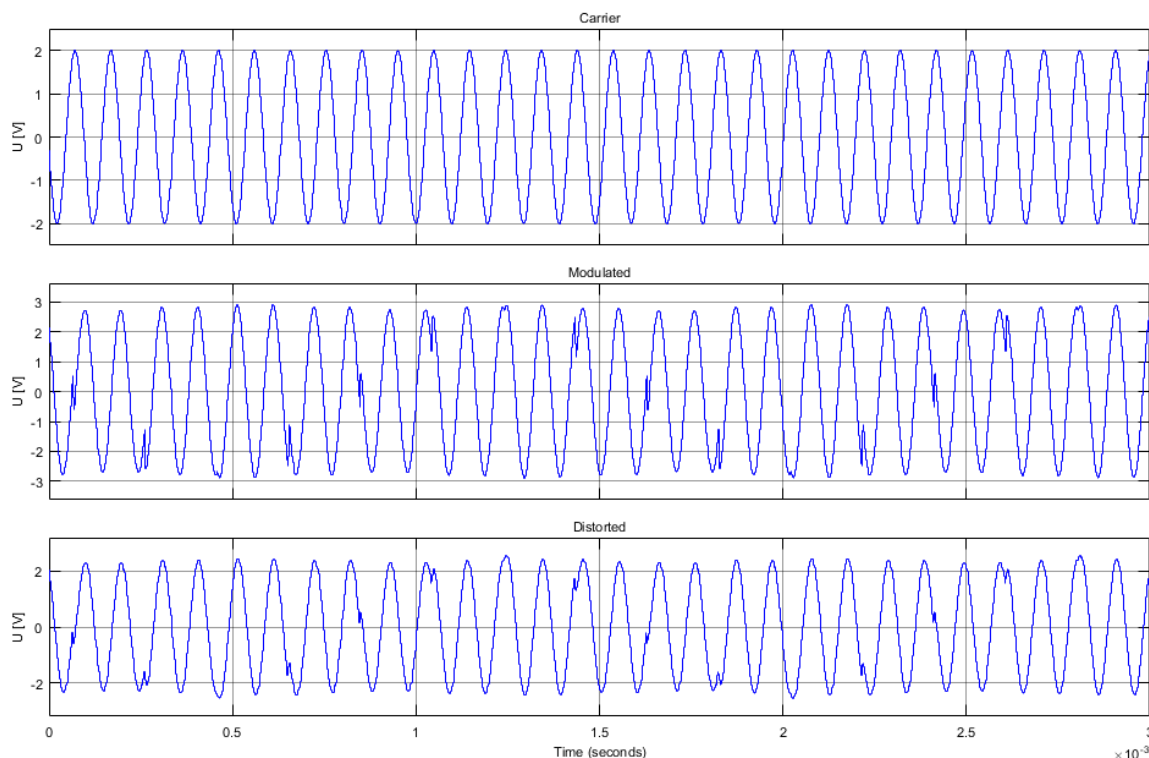
od okolních součástek uvnitř modulátoru. Tento oscilátor, ale také řídí přerušení pro program běžící na procesoru, což ovlivňuje generování dat a tím i modulovaný signál. Takto generovaná data mají různé doby trvání a nelze je přesně v programu Simulink zpracovat, protože pro správnou ekvalizaci a demodulaci je zapotřebí signál přesně převzorkovat a upravit tak, aby s nimi mohly ekvalizéry pracovat.

Proto bylo rozhodnuto o nahrání pouze jedné sekvence dat, ve které se razantně neprojevují vlivy nestabilního oscilátoru a tuto jednu sekvenci dat rozkopírovat několikrát za sebou a tím vytvořit průběhy pro ekvalizaci a demodulaci. Nahrávání všech tří signálů proto musí probíhat co nejrychleji. Takto nahrané sekvence všech tří signálů se jednoduše vzájemně synchronizují, oříznou a rozkopírují několikrát za sebou, stejně jako by byly generovány modulátorem. Úprava signálů probíhá v programu Matlab, kde se vloží nahrané soubory s koncovkou .mat, ty se následně pomocí příkazu převedou na matici o rozměru 1x počet vzorků, takto jsou získány tři matice signálů, podle počtu vzorků a známé vzorkovací frekvence se vygeneruje časová osa a poté je možné tyto matice zobrazit v grafu, čímž je zobrazen signál jako na osciloskopu. Pomocí kurzorů se změří začátek a konec sekvence dat u modulovaných signálů a podle těchto hodnot matici oříznout, tímto způsobem se signály vzájemně synchronizují. Takto stejně dlouhé signály uložené v matici se zkopírují několikrát za sebou a tím je získán signál pro demodulaci. Posledním krokem je vytvoření jedné matice ze všech tří signálů a časové osy o rozměru 4x počet vzorků. Na prvním řádku této matice jsou vzorky časové osy a na dalších řádcích jsou vzorky jednotlivých signálů.



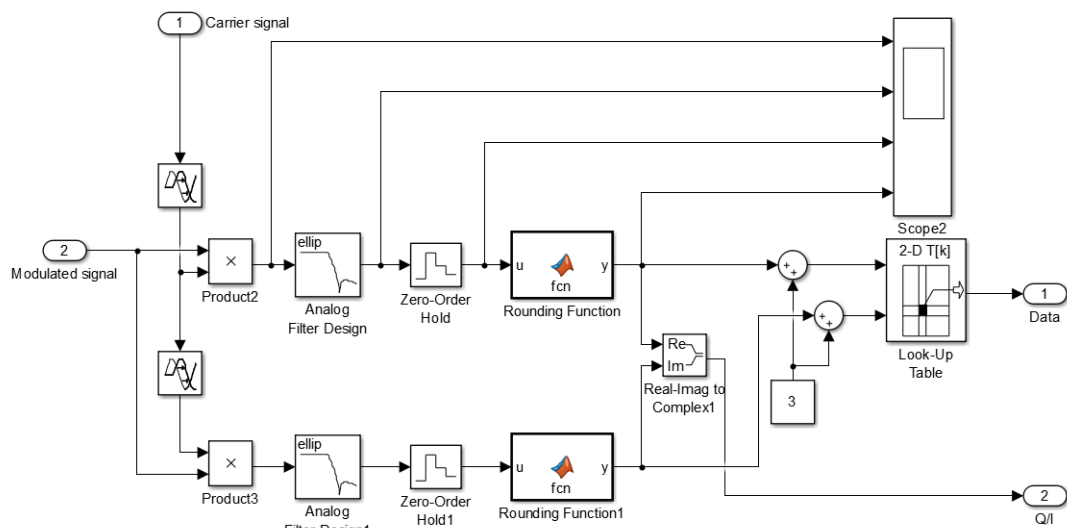
Obr. 2.35: Blokové schéma zapojení nahrávání signálů do souboru.

Jak již bylo řečeno, pro správnou funkci ekvalizace a demodulace signálu je zapotřebí tří signálů: nosný signál, modulovaný signál a modulovaný signál po průchodu přenosovým kanálem. Tyto signály jsou uloženy v souboru, které jsou pomocí bloku From Workspace importované do Simulinku, a tam jsou demultiplexovány.



Obr. 2.38: Časové průběhy signálu nosného, modulovaného a zkresleného modulovaného po průchodu přenosovým kanálem.

V tomto konkrétním přijímači jsou použity čtyři demodulátory, pracující na stejném principu, ale pokaždé demodulují jiný signál. První demodulátor (TX) demoduluje signál před přenosovým kanálem, a tím slouží jako náhrada za načítání vstupní sekvence dat z modulátoru. Takto získaná data slouží pro přesné porovnávání výsledků z ostatních demodulátorů. Tímto krokem jsou potlačeny vlivy nestabilního generování dat vznikajícího na straně vysílače, přesněji nestabilitou vnitřního oscilátoru v modulátoru. Druhý demodulátor (RX) demoduluje zkreslený signál po průchodu vícecestným přenosovým kanálem. Před třetí a čtvrtý demodulátor jsou zařazeny dva rozdílné ekvalizéry, do kterých je přiveden zarušený signál z přenosového kanálu, a které na základě nezarušeného modulovaného signálu přivedeného do vstupu Desired, nastaví své vnitřní filtry tak, aby se výstupní signál co nejvíce podobal tomu požadovanému.

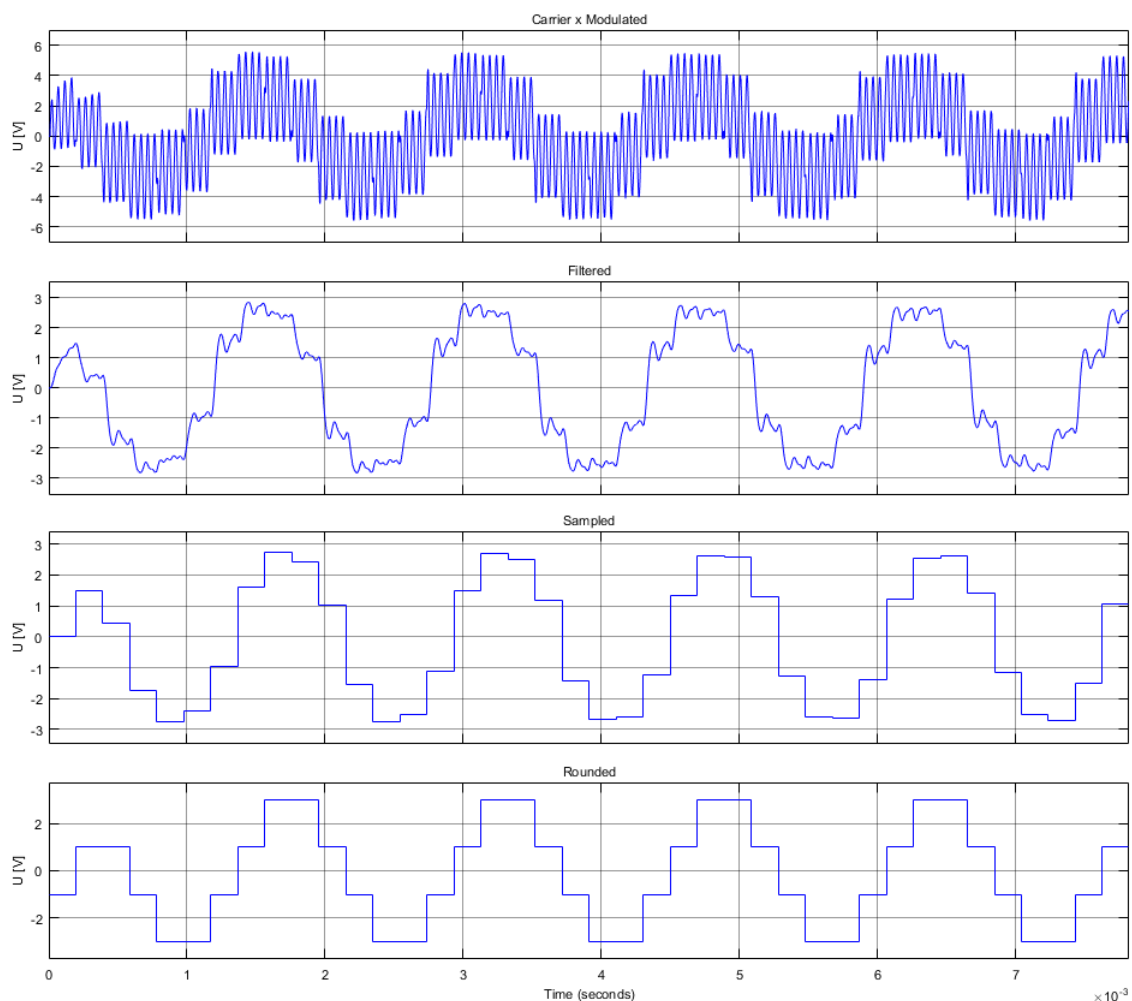


Obr. 2.39: Vnitřní blokové schéma demodulátoru.

Samotný demodulátor je sestavený rozdílně než v předchozí simulaci celkového přenosového systému, jelikož musely být použity jiné ekvalizéry. Modulovaný signál vstupující do demodulátoru je rozdělen do dvou větví, v jedné větvi se zpracovává reálná a v druhé imaginární složka modulovaného signálu. V reálné části je nejprve modulovaný signál násoben nosným signálem ve stejné fázi. V imaginární větvi je modulovaný signál násobený také nosným signálem, který je ale fázově posunutý o $\frac{\pi}{4}$. Následně jsou tyto signály v obou větvích filtrovány přes dolní propusti pro odstranění nosné vlny ze signálu. Na výstupech z filtrů je signál vzorkován, a poté se zaokrouhluje, podle rozmezí mezi vzorkovanými hodnotami. K těmto zaokrouhleným signálům je následně přičtená konstanta, pomocí které jsou vybírány hodnoty z konstelační tabulky, která je stejná jako v modulátoru, a tím dochází k dekodování dat.

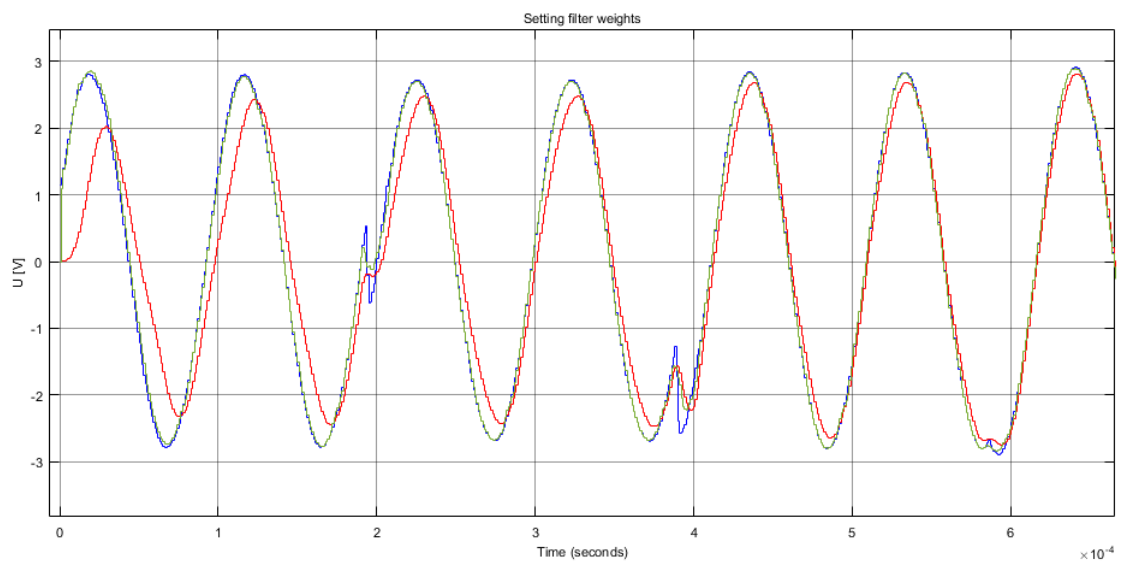
```
function y = fcn(u)
    if u <= -2
        y = -3;
    elseif (u > -2) && (u <= 0)
        y = -1;
    elseif (u > 0) && (u <= 2)
        y = 1;
    else
        y = 3;
    end
```

Obr. 2.40: Zaokrouhlovací funkce pro blok Rounding Function.

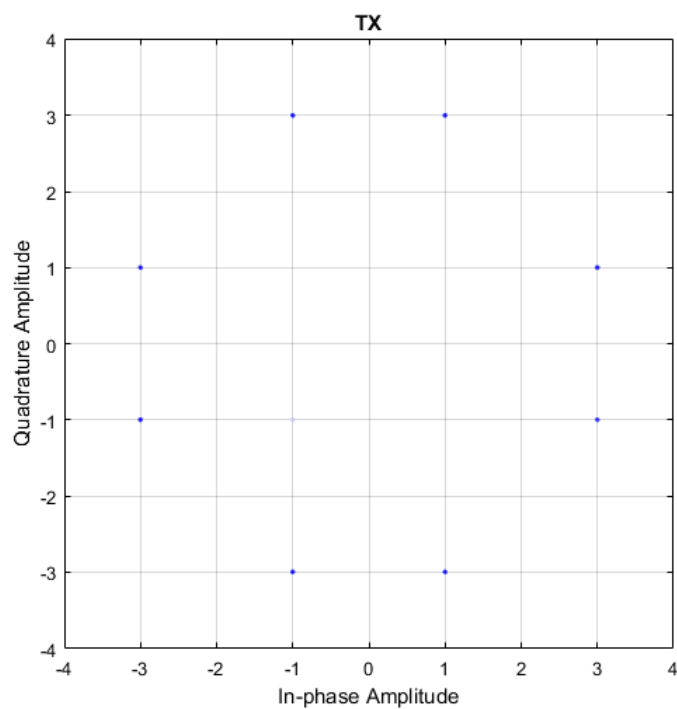


Obr. 2.41: Časové průběhy signálu uvnitř demodulátoru, první průběh zobrazuje signál po násobení nosného a modulovaného signálu, druhý průběh zobrazuje signál za filtrem, třetí signál zobrazuje navzorkovaný signál a čtvrtý průběh zobrazuje signál po zaokrouhlení.

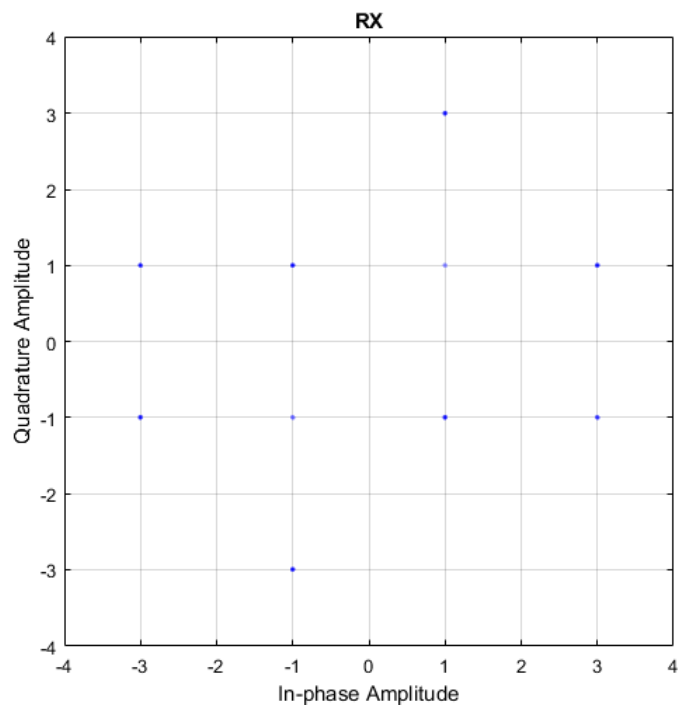
Následující obrázek zobrazuje výstupy jednotlivých demodulátorů, první průběh jsou zdrojová data kde, první symbol je chybný, což je způsobeno nabíháním demodulátorů. Přenášená data začínají od druhého symbolu a jedná se o stále opakující se sekvenci osmi symbolů, které byly navoleny na modulátoru. Vstupní sekvence symbolů je 8,1,3,10,14,7,5,12. Druhý průběh porovnává vstupní data (modrá) s daty (červená), které jsou přijaty a demodulovány po průchodu přenosovým kanálem. Zde jsou jasně vidět chyby, které jsou způsobeny fázovým posunem na přenosovém kanálu. Na třetím průběhu je porovnání vstupních dat (modrá) s daty (červená) po ekvalizaci pomocí LMS ekvalizéru. A poslední průběh porovnává vstupní data (modrá) s daty (červená) po ekvalizaci pomocí RLS ekvalizéru.



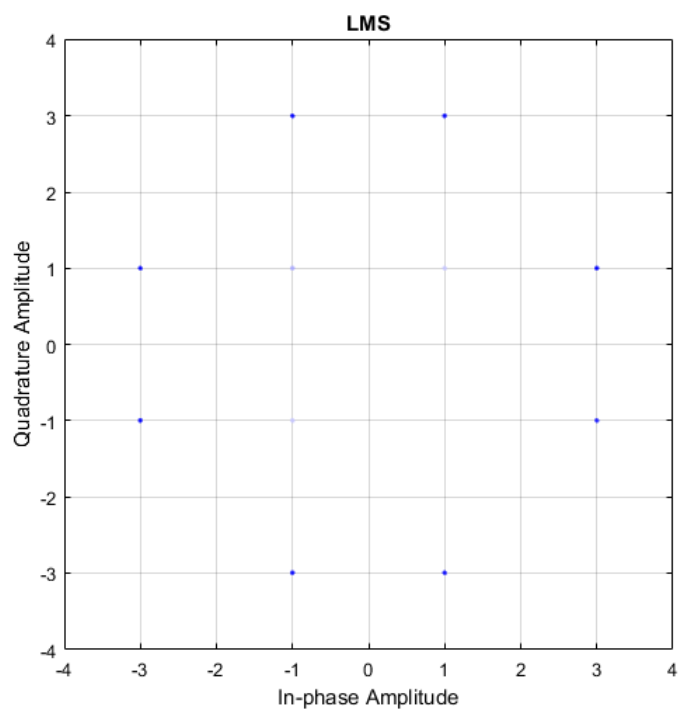
Obr. 2.43: Časové průběhy počátku nastavování ekvalizérů, modrý - požadovaný signál, červený - nastavování LMS ekvalizéru, zelený - nastavování RLS ekvalizeru.



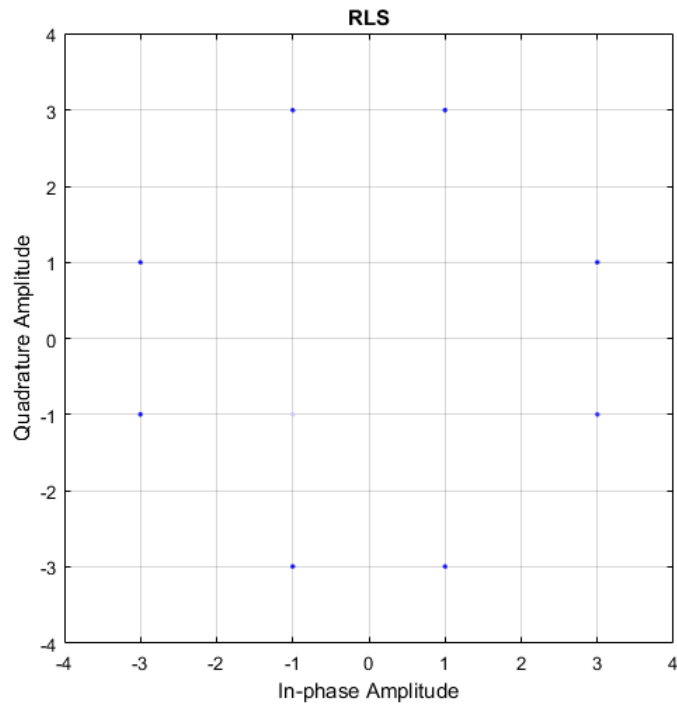
Obr. 2.44: Konstelační diagram vysílaného signálu.



Obr. 2.45: Konstelační diagram přijatého signálu bez ekvalizace.



Obr. 2.46: Konstelační diagram přijatého signálu po ekvalizaci LMS.



Obr. 2.47: Konstelační diagram přijatého signálu po ekvalizaci RLS.

Při porovnání výsledků časových průběhů jsou vidět patrné rozdíly u LMS a RLS ekvalizérů. LMS ekvalizér vykazuje zpočátku simulace chyby, ty jsou způsobeny pomalým nastavováním filtru, kvůli výpočetně jednoduchému algoritmu. Kdežto RLS ekvalizér pracuje spolehlivě od počátku simulace díky přesnému, ale zato výpočetně složitějšímu a náročnému algoritmu, tímto je zajištěn rychlý náběh ekvalizéru. Výstupní chybovost je také dána řádem filtru uvnitř ekvalizéru. Následující tabulka obsahuje chybovost při přenosu v závislosti na řádu filtru u použitých ekvalizérů. Na první pohled je patrné, že u RLS není závislý na řádu filtru díky složitým a přesným výpočtům. Ovšem u LMS se vzrůstajícím řádem filtru klesá chybovost. To znamená že, vyšší řád filtru u LMS kompenzuje nevýhodu pomalého nastavování ekvalizéru a tím nastavování zrychluje. Počet chyb vyskytujících se u ekvalizérů je dán jejich počátečním nastavováním, po nastavení ekvalizéry spolehlivě ekvalizují přenášený signál.

Tab. 2.1: Tabulka chybovostí použitých ekvalizérů.

Řád filtru	Chybovost LMS	Chybovost RLS
4	0,175	0
8	0,125	0
16	0,050	0
32	0	0

2.5 Laboratorní úloha

Poslední součástí zadání bylo vytvořit laboratorní úlohu na téma Ekvalizace přenosového kanálu do předmětu teorie sdělování. Cílem úlohy je prakticky seznámit studenty s ekvalizačními technikami, které jsou potřebné při opravě signálu po průchodu vícecestným přenosovým kanálem. V úloze se studenti seznámí, jak vypadá signál před průchodem a po průchodu přenosovým kanálem, tento signál následně ekvalizují, demodulují a zjistí sekvenci přenášených dat. Teorie, podrobný postup, vypracování a vzorové řešení laboratorní úlohy se nachází v příloze této práce.

3 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo seznámit se s ekvalizačními technikami, které se používají pro opravu signálů. Dále pak sestavit funkční simulaci v programu Simulink. Podle přenosového kanálu z této simulace následně navrhnout a nasimulovat z reálných součástek a vyrobit model přenosového kanálu. Hlavním cílem bylo použít vyrobený přenosový kanál společně s IQ modulátorem, jako vysílací a přenosové součásti přenosového systému. Následně pak signál pomocí A/D převodníkové karty ADVANTECH PCI-1712 nahrát do počítače, konkrétně do programu Simulink a tam pomocí bloků ekvalizérů a demodulátorů signály zpracovat a následně porovnat výsledky.

V teoretické části jsou rozebrány filtry a adaptivní algoritmy, ze kterých se skládají samotné ekvalizéry, a také základní rozdělení a typy nepoužívanějších ekvalizérů.

Praktická část se zabývá popisem jednotlivých funkčních bloků simulace se zobrazením časových průběhů tak, jak se postupně zpracovávají od vysílače, až k příjemci. Následně jsou zobrazeny výsledky pro pár hodnot rozptylu šumu a následném zpracování signálu na třech typech nepoužívanějších ekvalizérů. Když porovnáme samotné ekvalizéry, nejlepší výsledky má DFE ekvalizér, který díky zpětnovazebnímu filtru dokáže opravit šumem zarušený signál. V porovnání s lineárními ekvalizéry je rozdíl vidět na první pohled. Lineární ekvalizéry také dokážou plnit svou funkci, ovšem nemají takovou odolnost proti většímu šumu. V další části je návrh přenosového kanálu, tento návrh vychází ze simulace kdy je pro posunutí fáze na jednotlivých trasách realizováno dolnoproustními filtry a následně jsou tyto signály sečteny a z externího zdroje je možné přidat bílý gaussovský šum. Obvod byl nejprve odsimulován v programu LTspice XVII a následně zapojen na kontaktním poli a poté otestován v reálném zapojení. Výsledné fázové zpoždění lze volit přepínači na přípravku kombinací přímé cesty a připojováním dalších dvou cest do přenosu.

Tento zkonstruovaný přípravek byl následně použit v dalším úkolu této práce, kdy byl připojen k IQ modulátoru, který generuje opakující se sekvenci dat a následně tato data moduluje 16-QAM modulací, poté je tento modulovaný signál přiveden na vstup přenosového kanálu, kde dojde k jeho zkreslení. Následně je za pomoci A/D převodníkové karty tento signál nahrán do PC společně s dalšími signály potřebnými k ekvalizaci a demodulaci přenášeného signálu. V této části se ale vyskytlo mnoho problémů, počínaje nefunkčním přípravkem IQ modulátoru, který musel být opraven, aby bylo čím generovat modulovaný signál. Příčinou, proč byl tento přípravek nefunkční, bylo zoxidování prokůvů na oboustranné desce plošného spoje. Proto musel být přípravek rozebrán, všechny komponenty bylo zapotřebí odpájet a znovu připájet z obou stran desky plošného spoje. Tímto krokem, který byl nad

rámec zadání této diplomové práce, byl zprovozněn přípravek IQ modulátor. Pro správnou ekvalizaci a demodulaci je zapotřebí nahrávat tři signály, těmi jsou nosný signál, vyslaný modulovaný signál, a vyslaný modulovaný signál po průchodu přenosovým kanálem. Další problém se vyskytl při nahrávání signálů do počítače, kdy karta fungovala správně jen při nahrávání na první vstup, pokud bylo použito více vstupů než jeden, v nahrávaných signálech se objevovalo rušení, a signál byl značně deformován. Zároveň klesala vzorkovací frekvence s počtem aktivovaných vstupů, což značně přidávalo zkreslení do nahrávaných signálů. Proto bylo vyzkoušeno použití tří stejných A/D převodníkových karet s tím, že každá karta bude nahrávat jen jedním svým vstupem. Tento pokus taky nebyl úspěšný jelikož karty nebyly spolu nijak synchronizovány a externí synchronizace, kterou karty umožňují se nepodařilo zprovoznit. Po konzultaci s vedoucím práce bylo rozhodnuto, že průběhy nebudou nahrávány v reálném čase, ale budou postupně nahrány za sebou do souboru a poté synchronizovány v počítači. Po nahrání souboru se objevil problém se synchronizací průběhů, a bylo zjištěno že oscilátor v IQ modulátoru je nestabilní a jeho frekvence stoupá o desítky hertzů v závislosti ohřevu od okolních součástek uvnitř přípravku. Tento oscilátor řídí celý přípravek modulátoru generuje nosnou frekvenci, a od tohoto signálu je tvořen hodinový signál pro přerušení v procesoru. Tento problém byl eliminován nahráním jedné periody opakujícího se signálu a jejím zkopírováním v počítači několikrát za sebou. Tak byl zkonstruován signál který nebude ovlivněn měnící se frekvencí. A také musely být všechny tři signály nahrány co nejrychleji za sebou. Kvůli těmto problémům s oscilátorem a nahráváním musely být použity ekvalizéry, které pracují pouze v režimu trénování, kdy dojde k natrénování pokaždé po spuštění simulace, a také došlo ke změně demodulátorů oproti první simulaci.

Po vyřešení těchto problémů jsou nahrané zarušené signály opraveny pomocí LMS a RLS ekvalizéru a v přiložených konstelačních diagramech a časových průbězích lze pozorovat vlastnosti těchto algoritmů, kde je vidět rychlost konvergence RLS algoritmu oproti LMS. Tato rychlost konvergence je způsobena výpočetní náročností použitých algoritmů. V praxi se často volí výpočetně jednodušší LMS, díky tomu má nižší požadavky na implementaci a hardware, ale zato není tak přesný oproti RLS. Lepší porovnání těchto dvou ekvalizérů by bylo, kdyby zarušený signál z přenosového kanálu byl zarušen také bílým šumem, to ale z důvodu problémů při nahrávání do PC nelze uskutečnit, jelikož by nebyla možnost přesně synchronizovat a zkopírovat celou periodu zarušeného i nezarušeného modulovaného signálu. Z toho důvodu v této části není použit DFE ekvalizér, který dokáže ekvalizovat i šumem zarušený signál díky své zpětné vazbě. Jeho nevýhodou je tendence ke kumulaci chyb při vyšších hodnotách šumu, pokud tedy dojde k chybě, kvůli zpětné vazbě se chyba může opakovat a tím vznikají shluky chyb. Bez šumu na přenosovém kanálu není zřejmá výhoda tohoto ekvalizéru, oproti těm lineárním (LMS, RLS), které

nezvládají signál spolehlivě opravit při vyšším zarušení signálu šumem.

V poslední části je laboratorní úloha na téma „Ekvalizace přenosového kanálu“, která zahrnuje teorii a postup měření, podle kterého lze tato laboratorní úloha jednoduše změřit. V další části je obsaženo výsledné měření, které bude sloužit pro vyučující, kteří podle této předlohy budou kontrolovat správnost naměřených výsledků.

LITERATURA

- [1] ČÍŽ, R. *Principy modulací a přenosu sdělovacích signálů pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO* [online]. 2014 [cit. 2018. 5. 15]. ISBN 978-80-214-5117-9.
- [2] SMÉKAL, Zdeněk. *Číslicové zpracování signálů* [online]. Brno, 2012 [cit. 2018. 5. 15]. ISBN 978-80-214-4639-7.
- [3] STROUHAL, M. *Adaptivní filtry pro zpracování biologických signálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014, 30 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.. [cit. 2018. 5. 15].
- [4] FARHANG-BOROUJENY, B. *Adaptive filters: theory and applications*. New York: Wiley, c1998.[cit. 2018. 5. 15]. ISBN 04-719-8337-3.
- [5] DUFFEK, L. *Modulátor QAM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008, 72 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Radim Číž, Ph.D.. [cit. 2018. 5. 15].
- [6] MATLAB *MATLAB* [online]. 2017. [cit. 2018. 5. 15]. Dostupné z URL: <<https://www.mathworks.com/help/matlab/>>.
- [7] Texas Instruments *LM324N* [online]. 2015. [cit. 2018. 5. 15]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/ds/snosc16d/snosc16d.pdf>>.
- [8] Texas Instruments *TL072* [online]. 2012. [cit. 2018. 5. 15]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl072-ep.pdf>>.
- [9] ADVANTECH *PCI-1712* [online]. 2015. [cit. 2018. 5. 15]. Dostupné z URL: <<http://advdownload.advantech.com/productfile/PIS/PCI-1712/Product-Datasheet/PCI-171220150714145348.pdf>>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

FIR	Filtr s konečnou impulsní odezvou – Finite Impulse Response
IIR	Filtr s nekonečnou impulsní odezvou – Infinite Impulse Response
LMS	Algoritmus nejmenší střední kvadratické odchylky – Least Mean Square
RLS	Rekurzivní algoritmus nejmenších čtverců – Recursive Least Square
DFE	Ekvalizér se zpětnou rozhodovací vazbou – Decision Feedback Equalizer
ML	Ekvalizér s nejvíce pravděpodobným odhadem – Maximum Likelihood
MLSE	Ekvalizér s nejvíce pravděpodobným odhadem poslounosti symbolů – Maximum Likelihood Sequence Estimator
BPSK	Dvoustavové fázové klíčování – Binary Phase Shift Keying
QPSK	Čtyřstavové fázové klíčování – Quadrature Phase Shift Keying
8PSK	Osmistavové fázové klíčování – 8 Phase Shift Keying
16-QAM	Kvadraturní amplitudová modulace – Quadrature Amplitude Modulation
RX	Přijaté – Received
TX	Odeslané – Transmitted
A/D	Převod analogového signálu na digitální – Analog to Digital
DPS	Deska plošných spojů – Printed Circuit Board
ISI	Mezisymbolové přeslechy – Intersymbol Interference

SEZNAM PŘÍLOH

A	Zadání laboratorní úlohy	61
B	Vzorové vypracování	65
C	Protokol o měření	67
D	Schéma	71
E	Osazovací plán a deska plošného spoje	72
F	Rozpiska součástek	73
G	Potisk panelu	74
H	Obsah přiloženého CD	75

A ZADÁNÍ LABORATORNÍ ÚLOHY

Ekvalizace přenosového kanálu

Jména a Příjmení:

Datum:

Studijní obor:

Ročník:

Cíl úlohy

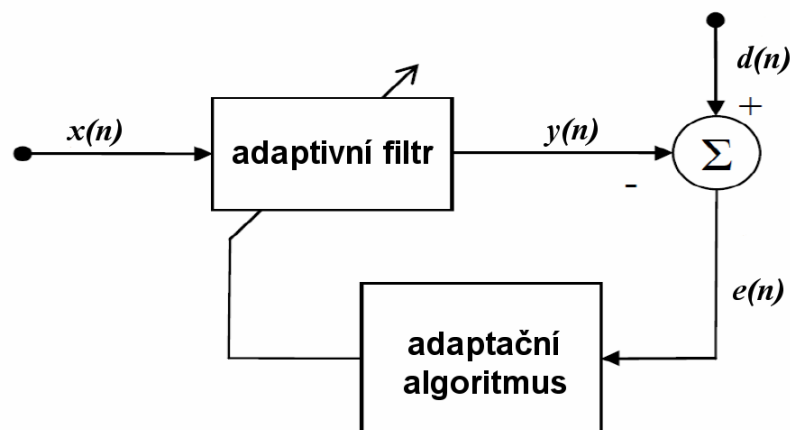
Seznámení s principy základních ekvalizačních metod, 16-QAM modulací a vícecestným přenosem signálů.

Seznam přístrojů a pomůcek

1. Počítač s nainstalovaným programem Simulink
2. Soubor s nahranými signály

Teoretický úvod

Tato laboratorní úloha se zabývá přenosem digitální informace modulované 16-QAM modulací skrze vícecestný přenosový kanál na kterém dochází ke zkreslení signálu. Tento zkreslený signál je dále zapotřebí opravit (ekvalizovat) a poté je možné jej bezchybně demodulovat. Ekvalizéry se běžně používají v přijímačích pro kompenzaci zkreslení signálu, které vzniká při průchodu přenosovým kanálem. Přenosová funkce ekvalizéru, potřebná pro dokonalou kompenzaci zkreslení kanálu, je rovna reciproké hodnotě přenosové funkce tohoto kanálu násobené konstantou $K^{-j\omega t_d}$. Z toho důvodu se ekvalizační obvody často nazývají jako inverzní ekvalizační filtry. Samotný adaptivní ekvalizér přizpůsobuje automaticky svou přenosovou funkci aktuálně podle přenosové funkce komunikačního kanálu. Každý adaptivní systém se skládá ze dvou základních funkčních bloků. Prvním z nich je adaptační algoritmus, který určuje koeficienty adaptačního filtru a ten pak upravuje výstupní signál. V základním adaptivním systému jsou tyto signály: vstupní signál $d(n)$, vstupní referenční signál $x(n)$, dále pak výstupní chybový signál $e(n)$ a posledním je výstupní signál adaptivního filtru $y(n)$.



Obr. A.1: Blokové schéma základního adaptivního systému.

Jako adaptivní filtry se nejčastěji používají číslicové diskrétní filtry s konečnou impulzní odezvou (FIR) N -tého řádu, kvůli jejich stabilitě a lineární fázi. Také platí, že čím je řád filtru větší, tím je výsledek přesnější, ale výpočet o to náročnější. O přesné nastavení jednotlivých koeficientů filtrů se starají adaptační algoritmy, které udávají matematický popis adaptace. Mezi základní a také nejpoužívanější adaptační algoritmy patří: LMS (Least Mean Square), který je založený na teorii Wienerovy filtrace a RLS (Recursive Least Square), založený na teorii Kalmanovy filtrace. Výběr vhodného adaptačního algoritmu je důležitou částí pro efektivní nastavování koeficientů filtru. Důležité parametry adaptivního systému jsou:

- Poměr adaptace
- Výpočtové požadavky
- Adaptace na prostředí

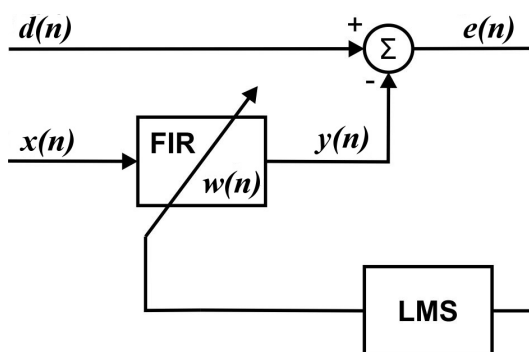
Poměr adaptace, neboli poměr konvergence udává, jak rychle se systém může přiblížit k optimálnímu nastavení vah filtrů.

Výpočtové požadavky popisují složitost a počet operací za daný čas potřebný pro vyhodnocení výstupních dat algoritmu.

Adaptace na prostředí je schopnost přizpůsobení filtru na různé prostředí s různě velkým šumem.

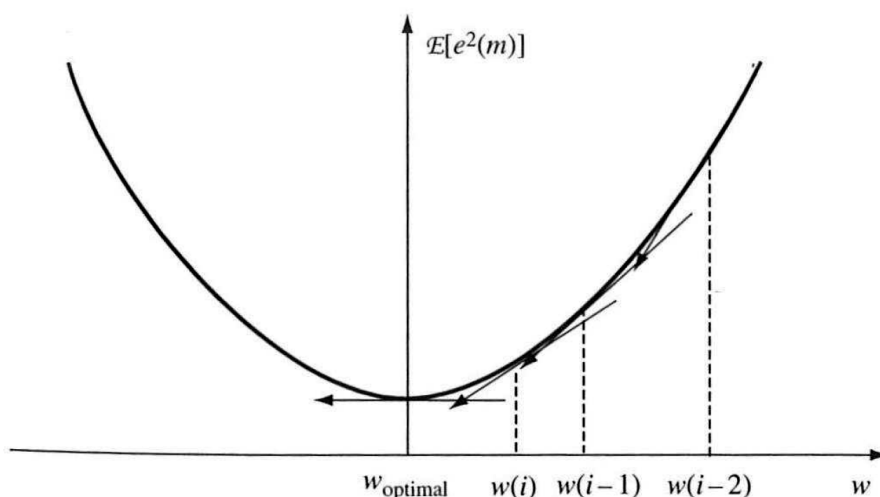
LMS (Least Mean Square) algoritmus - algoritmus nejmenší střední kvadratické odchylky nebo také metoda největšího spádu. Stal se základním představitelem gradientních algoritmů, které jsou založeny na teorii Wienerovy filtrace, metodě nejmenších čtverců a stochastickém průměrování. Mezi jeho hlavní výhody určité

patří nízká výpočtová složitost a vcelku jednoduchá implementace.



Obr. A.2: Blokové schéma adaptivního systému s LMS algoritmem.

Kvadratická křivka s jedním globálním minimem udává závislost střední kvadratické odchylky výstupního chybového signálu adaptivního FIR filtru na koeficientech filtru.



Obr. A.3: Vyhledávání nulového gradientu střední kvadratické odchylky.[3]

Vyhledávání jednotlivých koeficientů s minimální střední kvadratickou odchylkou se zakládá na posouvání koeficientů ve směru záporného gradientu křivky. Začínající hodnoty koeficientů jsou postupně adaptovány dokud se nedosáhne minima, tedy bodu s nulovým gradientem. Tuto metodu, tedy metodu největšího spádu, můžeme vyjádřit vztahem, kde nahradíme střední kvadratickou odchylku chybového signálu

signálem samotným, tím dosáhneme výpočetně jednodušší verzi:

$$w(n+1) = w(n) + \mu \left[-\frac{\partial e^2(n)}{\partial w(n)} \right] \quad (\text{A.1})$$

Chybový signál $e(n)$ vyjádříme:

$$e(n) = d(n) - x^T(n)w(n), \quad (\text{A.2})$$

kde $x(n)$ je vstupní referenční signál. Po dosazení a úpravě dostaneme rovnici:

$$w(n+1) = w(n) + \mu [x(n)e(n)], \quad (\text{A.3})$$

Z této rovnice vyplývá jednoduchá výpočetní náročnost LMS algoritmu, protože se obejdeme bez složitých matematických operací jako derivování, umocňování atd. Rychlost adaptace se udává konstantou μ , tato hodnota musí být volena rozumně, jinak může dojít ke špatné adaptaci vah filtrů.[3][4]

RLS (Recursive Least Square) algoritmus - rekurzivní algoritmus nejmenších čtverců, je druhý nejpoužívanější algoritmus, který je založen na teorii Kalmanovy filtrace. Tento algoritmus pracuje s průměrnými hodnotami veličin počítanými z časového vývoje, místo vzorkovaných průměrů počítaných z několika realizací stejného náhodného procesu. Z toho plyne větší náročnost výpočtu, rozdíl je zhruba o řád vyšší než u LMS. Nadruhou stranu rychlost konvergence je u RLS několikanásobně rychlejší a to z důvodu přesné predikce díky časovému průměrování. Blokové schéma adaptivního filtru zůstává stejné jak u LMS, jen adaptivní proces je jiný. Chybový signál je vyjádřený stejně jako u LMS algoritmu:

$$e(n) = d(n) - x^T(n)w(n), \quad (\text{A.4})$$

koeficienty filtrů jsou adaptovány podle rovnice:

$$w(n+1) = w(n) + \mu [k(n)e(n)], \quad (\text{A.5})$$

kde $k(n)$ je ziskový vektor a počítá se podle rovnice:

$$k(n) = \frac{\lambda^{-1} \Phi_{xx}(n-1)x(n)}{1 + \lambda^{-1} x^T(n) \Phi_{xx}(n-1)x(n)}, \quad (\text{A.6})$$

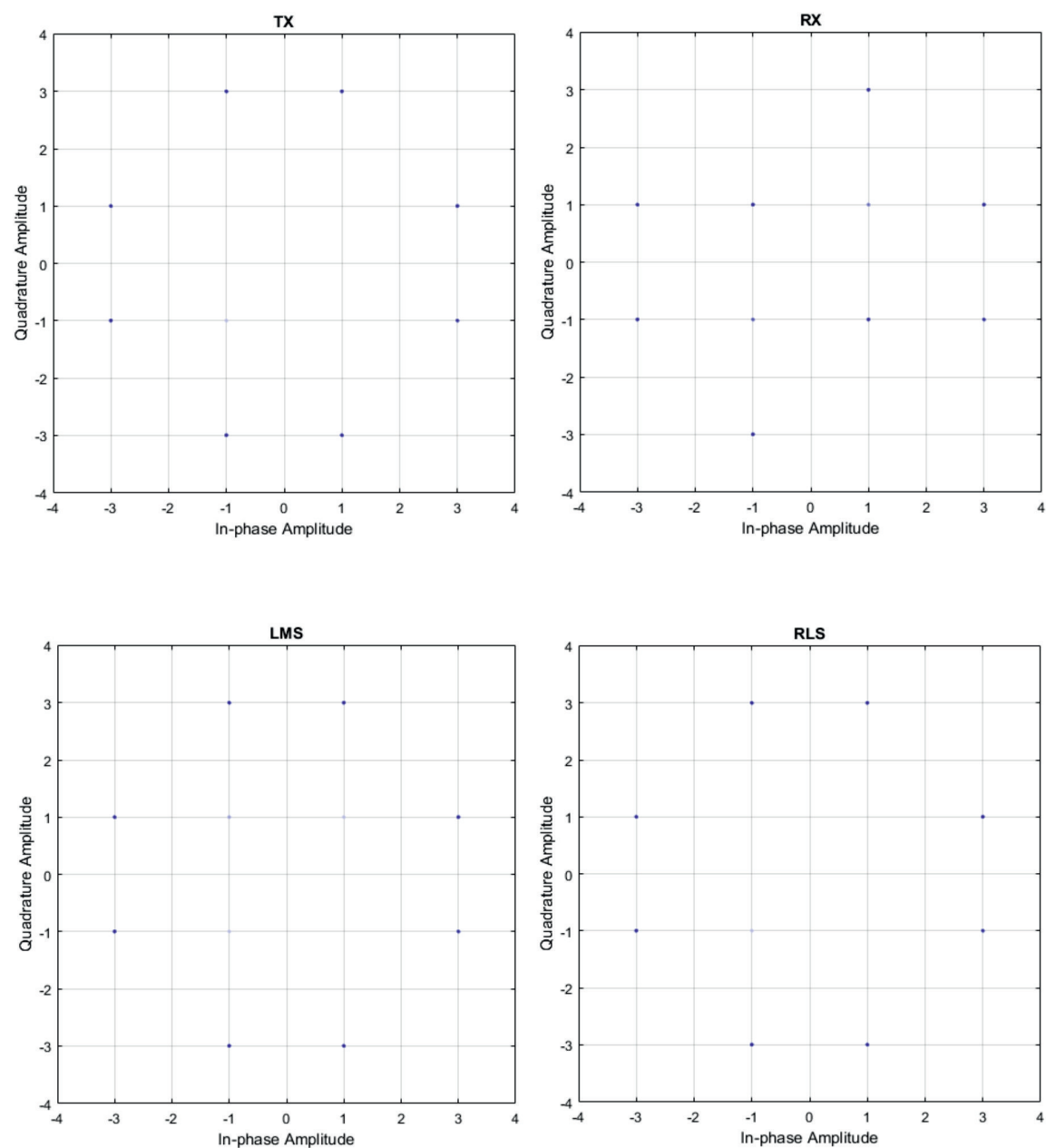
kde $\Phi_{xx}(n)$ je inverzní autokorelační matice referenčního signálu $x(n)$. Tato matice je následně adaptovaná podle vztahu:

$$\Phi_{xx}(n) = \lambda^{-1} \Phi_{xx}(n-1) - \lambda^{-1} k(n)x^T(n) \Phi_{xx}(n-1), \quad (\text{A.7})$$

λ je váha ($0 < \lambda \leq 1$) díky které se určuje rychlost konvergence algoritmu. V praxi se nejčastěji nastavuje na hodnotu mezi 0,98 až 1.[3][4]

B VZOROVÉ VYPRACOVÁNÍ

Konstelační diagramy:



Vyslaná opakující se sekvence dat:

Pořadí symbolu:	Dekadicky:	Binárně:
1.	8	1000
2.	1	0001
3.	3	0011
4.	10	1010
5.	14	1110
6.	7	0111
7.	5	0101
8.	12	1100
9.	8	1000
10.	1	0001
11.	3	0011
12.	10	1010
13.	14	1110
14.	7	0111
15.	5	0101
16.	12	1100

Vliv změny řádu filtru na chybovost:

Řád filtru	Chybovost LMS	Chybovost RLS
4	0,175	0
8	0,125	0
16	0,050	0
32	0	0

Závěr: Z měření vyplývá, že zvyšování řádu filtru u LMS zvyšuje rychlost a přesnost nastavení ekvalizéru. U RLS řád filtru nemá vliv na chybovost, díky přesnosti algoritmu. Zapsaná chybovost u ekvalizérů, jsou chyby, které se vyskytují během nastavování ekvalizéru. Po nastavení už k chybám nedochází a ekvalizéry spolehlivě přenášený signál opravují.

C PROTOKOL O MĚŘENÍ

Jména a Příjmení:

Datum:

Studijní obor:

Ročník:

Zadání

1. Porovnejte časové průběhy a konstelační diagramy po demodulaci signálu:
 - vyslaného z vysílače (nezarušený signál)
 - přijatého po průchodu vícecestným přenosovým kanálem (zarušený signál)
 - přijatého po průchodu vícecestným přenosovým kanálem a následné ekvalizaci pomocí LMS (opravený signál)
 - přijatého po průchodu vícecestným přenosovým kanálem a následné ekvalizaci pomocí RLS (opravený signál)
2. Určete z vyslaného signálu, jaká opakující se sekvence dat byla vyslána.
3. Zjištěnou sekvenci dat převedte do binární soustavy.
4. Změřte a porovnejte vliv řádu filtru na chybovosti dat.

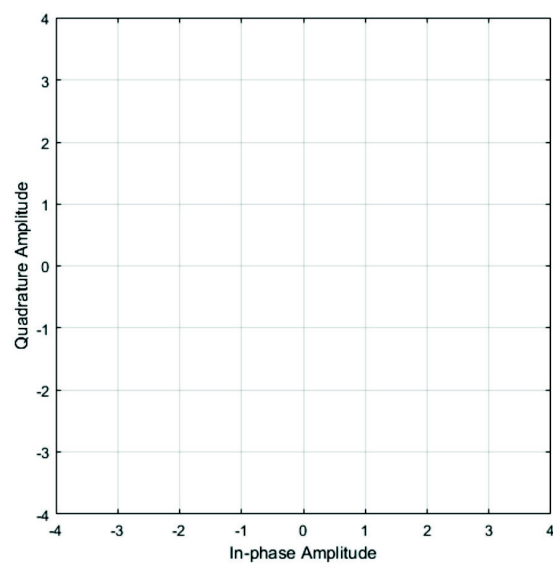
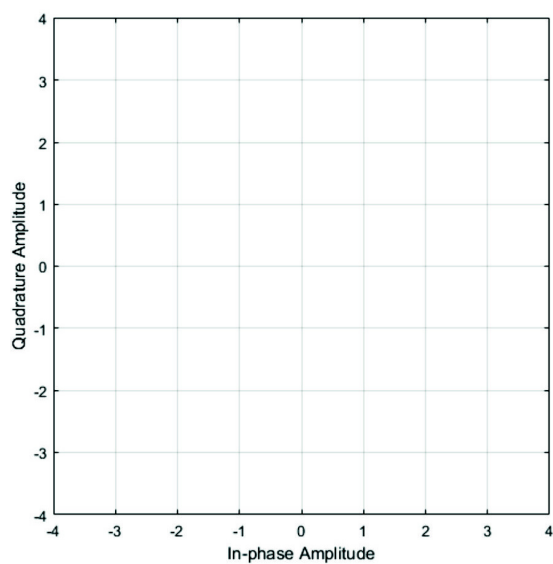
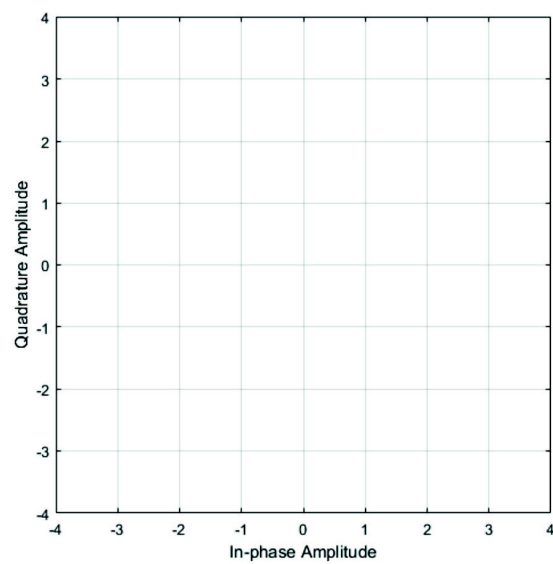
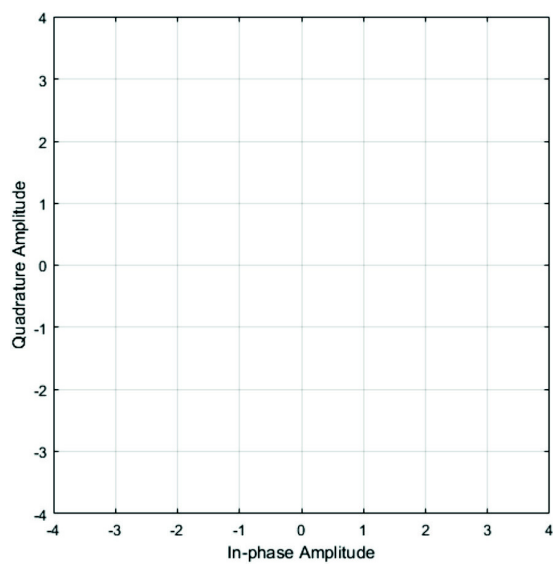
Postup měření

- a) Na připraveném počítači spusťte program Matlab.
- b) V programu Matlab otevřete připravený model simulace pomocí **File/Open** a vyberte soubor `Demodulace.mdl`.
- c) Před spuštěním samotné simulace je zapotřebí nahrát, zdrojový soubor předem nahraných signálů. To se provede přepnutím do programu Matlab a zadáním příkazu `load 16qam8smb.mat` do konzole. V okně Workspace se objeví 2 proměnné, první je `fc`, která udává frekvenci nosné vlny modulovaného signálu a druhou proměnnou je `sig_data`, uvnitř které je matice nahraných signálů.
- d) Po úspěšném nahrání proměnných do Workspace, můžeme přepnout do programu Simulink s otevřenou simulací a tuto simulaci spustit.
- e) Po proběhnutí simulace se zobrazí konstelační diagramy z demodulátorů, tyto diagramy porovnejte a zakreslete do protokolu.
- f) Na osciloskopu s názvem **Input signals** si můžete zobrazit vstupní signály a porovnat původní a zkreslený signál po průchodu vícecestným přenosovým kanálem.

- g) Poté si zobrazte časové průběhy na osciloskopu s názvem **Data** a porovnejte, jak vypadá demodulace bez ekvalizace a s ekvalizací za pomoci dvou různých metod ekvalizace.
- h) Z časového průběhu vyslaného signálu určete pomocí kurzorů, jaká opakující se sekvence dat byla vyslána a запиšte tyto hodnoty do protokolu.
- ch) Zjištěné hodnoty poté převedte do binární soustavy.
- i) Změřte jaký vliv má změna řádu filtrů v rozsahu 4-32, na chybovost signálu. Změna řádu filtru se provádí v blocích ekvalizérů a po každém spuštění simulace se ve výpočetních blocích zobrazí hodnota chybovosti, tu запиšte do tabulky. Na osciloskopu s názvem **Filter setting** pozorujte chování ekvalizérů.
- j) V závěru úlohy popište rozdíly použitých ekvalizérů, popište vliv změn řádu filtrů a jak tím byla ovlivňována chybovost přenášených dat.

Vypracování

Konstelační diagramy:



Vyslaná opakující se sekvence dat:

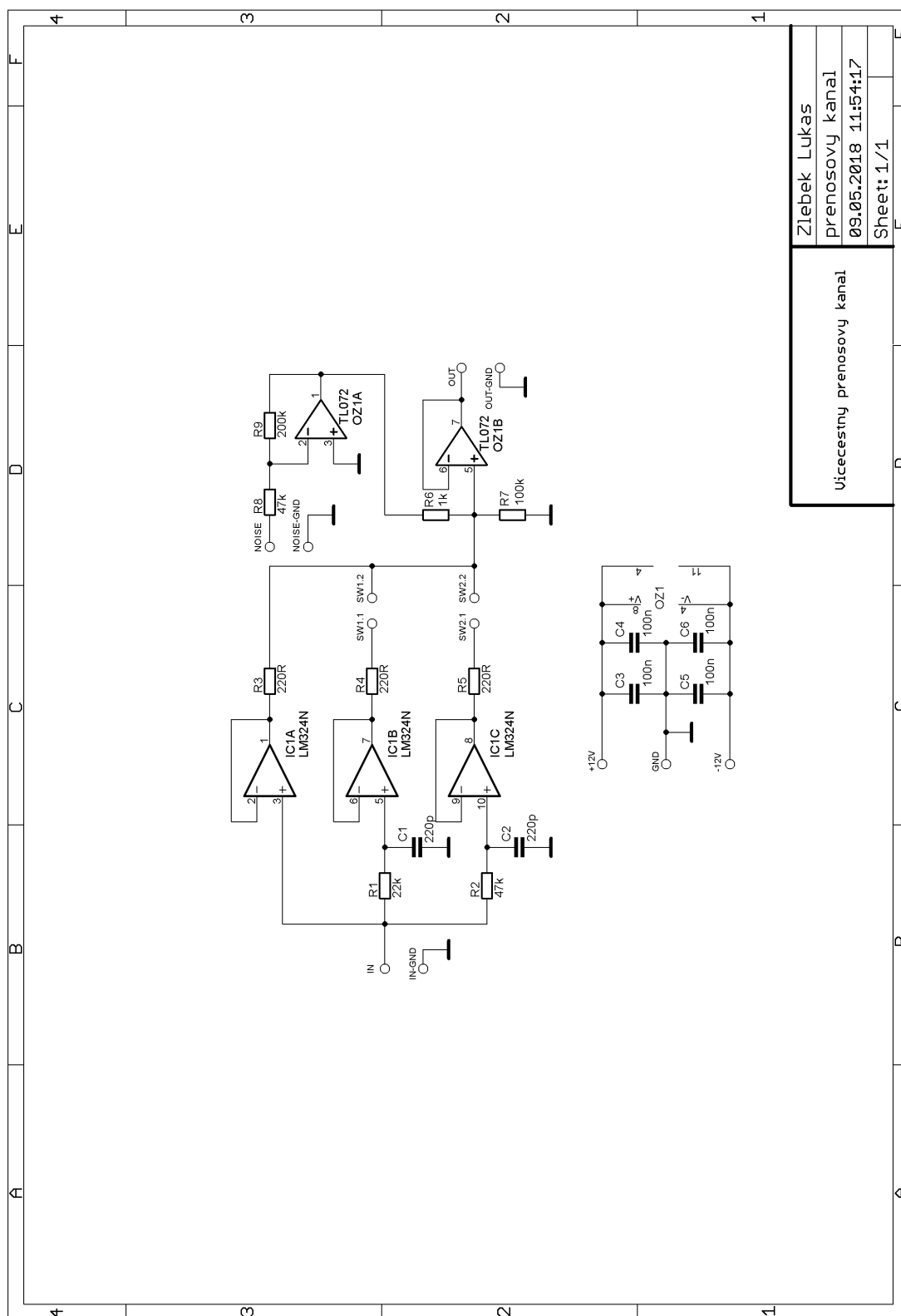
Pořadí symbolu:	Dekadicky:	Binárně:
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		
6.		
7.		
8.		
9.		
10.		
11.		
12.		
13.		
14.		
15.		
16.		

Vliv změny řádu filtru na chybovost:

Řád filtru	Chybovost LMS	Chybovost RLS
4		
8		
16		
32		

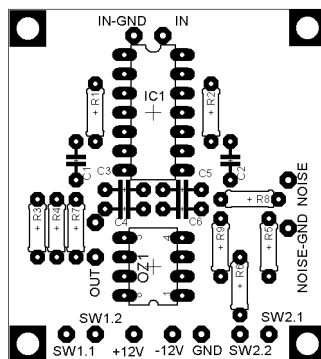
Závěr:

D SCHÉMA

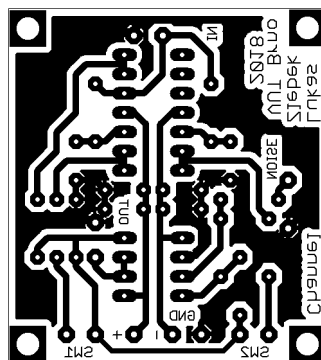


Obr. D.1: Schéma přípravku přenosového kanálu.

E OSAZOVACÍ PLÁN A DESKA PLOŠNÉHO SPOJE



Obr. E.1: Osazovací plán přípravku přenosového kanálu.

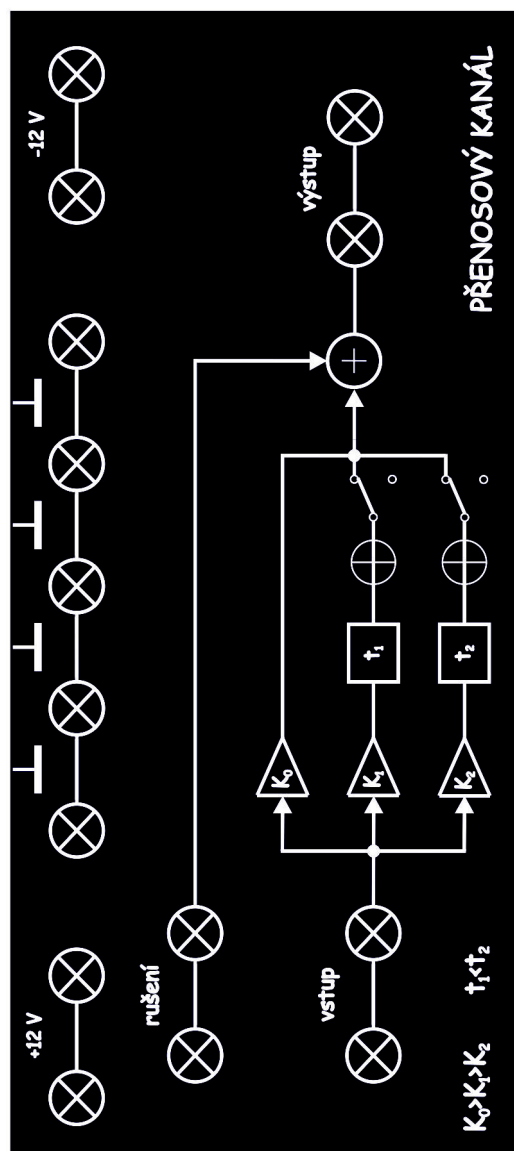


Obr. E.2: DPS přípravku přenosového kanálu v měřítku 1:1, skutečný rozměr je 42x47 mm.

F ROZPISKA SOUČÁSTEK

Součástka	Hodnota	Typ	Počet
R1	22k	0207	1
R2,8	47k	0207	2
R3,4,5	220R	0207	3
R6	1k	0207	1
R7	100k	0207	1
R9	200k	0207	1
C1,2	220pF	CK RM5	2
C3,4,5,6	100nF	CK RM5	4
IC1	LM324N	DIL14	1
OZ1	TL072	DIL8	1
Patice	DIL14PZ		1
Patice	DIL8PZ		1
Přístrojová zdířka:			
	SBZ RED		2
	SBZ GREEN		5
	SBZ BLUE		2
	SBZ WHITE		6
Krabička	KP29 (Z-38)		1

G POTISK PANELU



Obr. G.1: Potisk panelu generátoru v měřítku 1:1, skutečný rozměr je 152x68 mm.

H OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

Na přiloženém CD se nachází schéma a návrh DPS v programu Eagle 5.11.0. Simulace přenosového kanálu v programu LTspiceXVII. Dále modely simulací a soubor s nahranými průběhy pro program Simulink 8.6. A také návrh potisku panelu krabičky a nakonec i tento text v pdf souboru.